Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания касающаяся практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

Сердешнов Анатолий Петрович

"Ремонт электрооборудования. Ремонт электрических машин, часть 1" Минск, 2008 г.

Rev. 04   18 Dec 2021

Глава 10. Расчет обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя при ремонте.

Такой расчет, как правило, делают в том случае, если получить данные для выполнения новой обмотки по старой не представляется возможным или требуется проведение модернизации электромашины.
Работу в асинхронном двигателе (АД) выполняет вращающееся в расточке статора магнитное поле, следовательно, мощность асинхронного двигателя $P_{АСДВ}$ пропорциональна величине магнитного потока Ф, который создается магнитодвижущей силой *F*, равной произведению $I \times W$, а это значит, что величина Ф в магнитной цепи машины неизменна (Ф = const), отсюда можно написать:

$$P_{АСДВ} = \Phi = F = I \times W = const$$

F – магнитодвижущая сила, *Ампер–витки*.
Также известно, что магнитная индукция *B* (она же плотность магнитного потока, иначе нагрузка в магнитной цепи) равна, *Тл*:

$$B = \frac{\Phi}{Q} \quad (1)$$

Ф – магнитный поток, *Вб*; *Q* – площадь сечения магнитопровода, *м*^{2}.

Основная цель при выполнении расчета обмотки – получение максимально возможной мощности от ремонтируемого АД, т. е. следует установить максимально возможную величину магнитного потока Ф для его магнитопровода. Но еще из курса физики известно, что электротехническая сталь обладает насыщением (рис. 30) и магнитную нагрузку в магнитной цепи нельзя увеличивать бесконечно. Следовательно, мощность АД определяется размерами площадей его магнитопровода *Q*. Магнитопровод электромашины – та ее часть, которая набрана из штампованных пластин электротехнической стали в пакет.

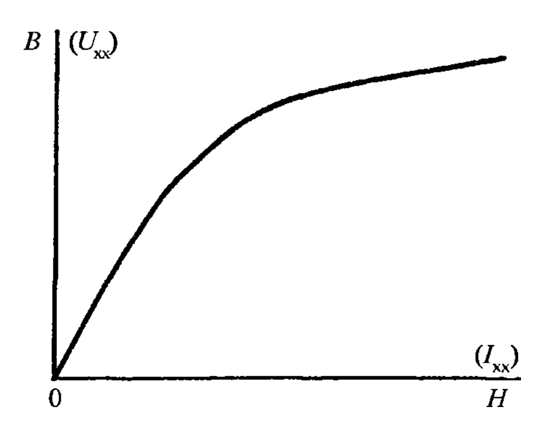


Рис. 30. Зависимость $B = f$(H) электротехнической стали.

Электротехническая сталь отличается от других марок меньшими потерями на вихревые токи. Это достигается, во–первых, легированием стали кремнием, оно увеличивает сопротивление (*R*) ее электрическому току. По закону Ома $I = E/R$, т. е. вихревые токи I_B уменьшаются, а, следовательно, сокращаются электропотери ΔP, так как

$$\Delta P = I_В^2 \times R$$

во–вторых, оптимальной толщиной листов стали, поскольку (по тому же закону) величина вихревых токов еще зависит от ЭДС (*E*). В листах $E = B \times l \times v$ (закон Фарадея), где *v* – скорость перемещения проводника; *B* – магнитная индукция; *l* – Длина проводника (в данном случае толщина листа стали δ). Отсюда, чем тоньше пластины, тем меньше *E*, а значит и потери. Вот почему магнитопроводы электрических машин набираются из листов стали рациональной толщины, изолированных друг от друга.
Ф, протекающий по магнитопроводу, постоянен, но плотность его (т. е. магнитная индукция – *B*) на отдельных участках магнитной цепи меняется в связи с тем, что меняются в ней сечения магнитопровода.

Это обусловливает в магнитопроводе асинхронного двигателя наличие следующих участков магнитной цепи: зубцовой зоны статора, его спинки, воздушного зазора, зубцовой зоны ротора, его спинки.

По конструктивному исполнению АД, площади в зубцовой зоне и спинке ротора больше, чем в соответствующих участках статора той же машины, отсюда магнитная индукция B в них будет меньше (1). Поэтому в расчетах магнитных нагрузок зубцовой зоной и спинкой ротора пренебрегают и указанные нагрузки проверяют только по участкам зубцовой зоны и спинки статора, а также воздушному зазору.

Исходя из изложенного, расчет обмотки асинхронного двигателя начинают с *обмера магнитопровода* ремонтируемой машины для определения сечений участков его магнитной цепи, по которым будет протекать поток Ф. При этом замеряются следующие размеры (рис. 31), *мм.*: D – внутренний диаметр сердечника статора; Da – внешний диаметр сердечника статора; l – полная длина сердечника статора; δ – толщина листов стали, *мм.*; также устанавливается род изоляции между листами электротехнической стали; Z – число пазов (зубцов), шт.

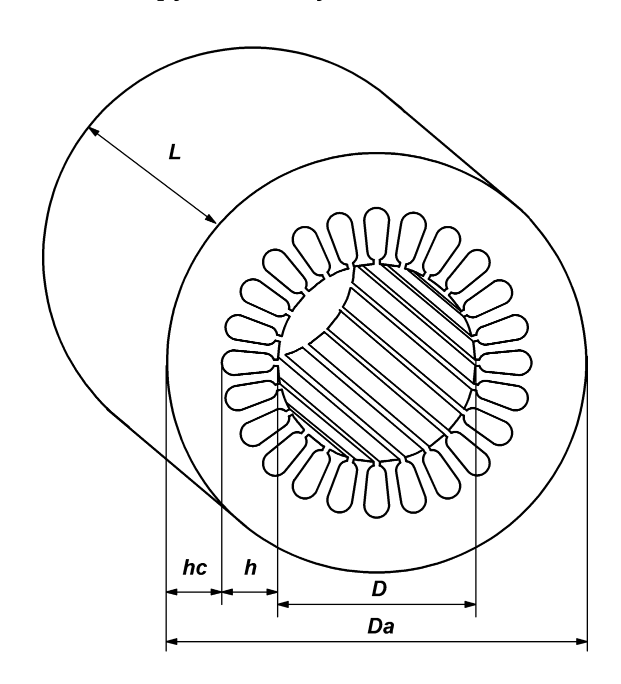


Рис. 31. Магнитопровод асинхронного двигателя.

Для определения сечения обмоточного провода требуется знание площади паза. Причем профиль его может быть самой различной конфигурации. Но с помощью осевых линий любой из них легко делится на простые фигуры. Причем каждый профиль паза для расчета площади требует осевых линий, снятия размеров и формул расчета (рис. 32).

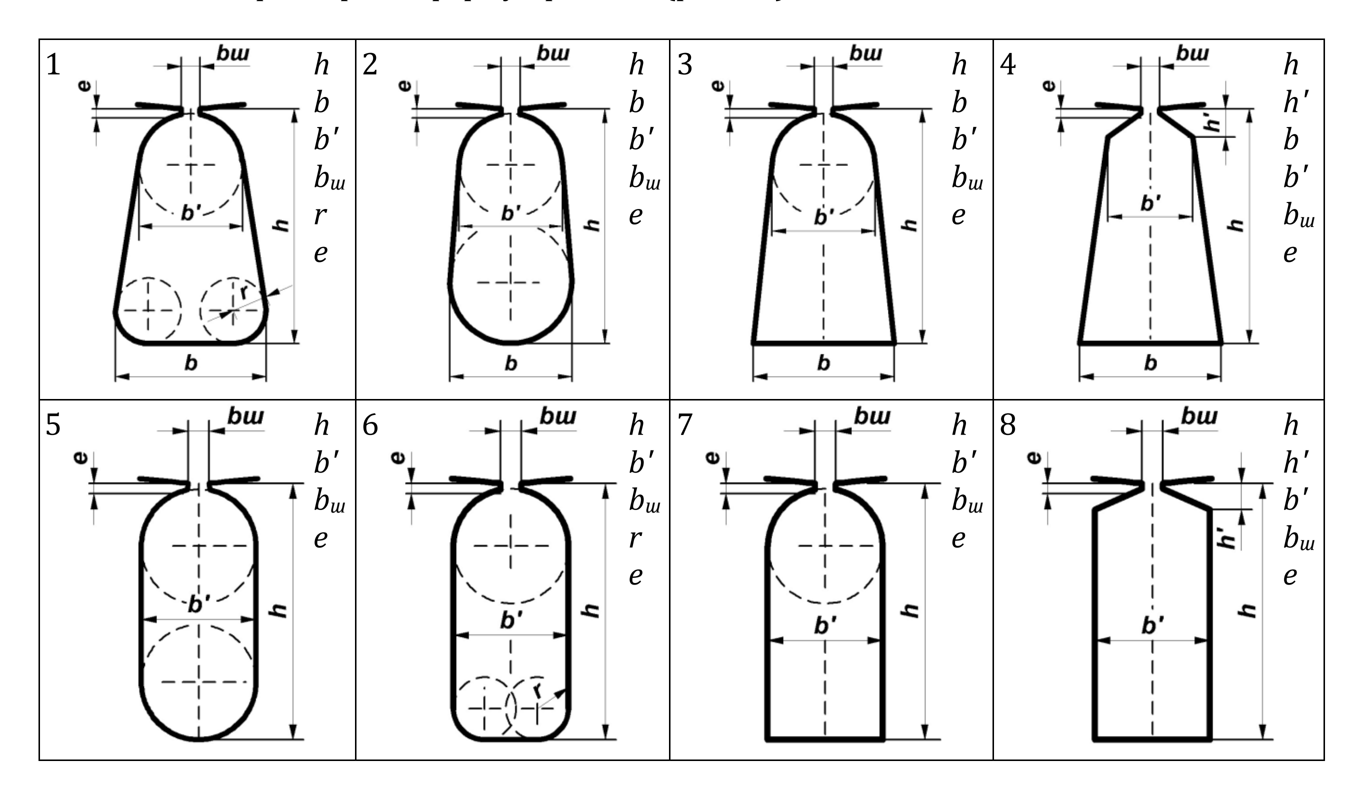


Рис. 32. Наиболее употребляемые профили пазов магнитопроводов асинхронных двигателей.

На рис. 32: b – большой размер ширины паза, *мм.*; b'– меньший размер ширины паза, *мм.*; bш – ширина шлица паза, *мм.*; h – полная высота паза, *мм.*; e – высота усика паза, *мм.*; r – радиус закругления углов, *мм.*; h' – высота трапеции. В профилях 5 – 8 – размеры $b = b'$. Например, профиль паза 1 осевыми линиями разделяется на площади следующих фигур: полуокружности с диаметром b' трапеции с основаниями b и b', прямоугольника с шириной r и длиной (b – 2 × r), двух четвертей окружности с радиусом r.
Вместе с размерами магнитопровода асинхронного двигателя для расчета обмотки необходимо знание технических условий потребителя (заказчика), в которые входят частота вращения магнитного поля статора (n), *мин*$^{-1}$; фазное напряжение (Uф) обмотки статора, *в*; частота тока (f), *гц.*; схема соединения фазных обмоток (Y/△).
В целях упрощения дальнейших расчетов обмотки асинхронного двигателя целесообразно провести обработку полученных выше результатов измерений.

10. 1. Подготовка данных обмера магнитопровода.

Подготовка данных обмера магнитопровода включает расчеты площадей магнитной цепи асинхронного двигателя: полюса в воздушном зазоре ($Q\delta$), в зубцовой зоне статора (Qz), поперечного сечения спинки статора (Qc), площади паза в свету (Qп). Первые три площади необходимы для расчета магнитных нагрузок (B).
В воздушном зазоре сопротивление магнитному потоку по всей площади равномерное, поэтому, *м*^{2}:

$$Q\delta = \tau \times l\text{р} \quad (2)$$

где: τ – полюсное деление (ширина полюса в воздушном зазоре), *м.*:

$$\tau = \frac{\pi \times D}{2 \times p} \quad (3)$$

где p – количество пар полюсов:

$$p = \frac{60 \times f}{n} \quad (4)$$

lр – расчетная длина сердечника статора (без поперечных каналов для его охлаждения):

$$l\text{р} = l - l_{\text{К}} \times n_{\text{К}}$$

где: l – полная длина магнитопровода, *м.*; $l_{\text{К}}$ и $n_{\text{К}}$ – ширина поперечных каналов (*м*) и их число, если каналов нет lр = l.
В зубцовой зоне статора магнитный поток протекает только по листам электротехнической стали, так как ее магнитная проницаемость много больше, чем изоляции листов. Следовательно, длина магнитопровода l, а значит и площадь полюса сократятся Qz (на площадь, занимаемую изоляцией). Отсюда Qz будет равна произведению *активной* площади зубца на их количество в полюсе, *м*^{2}:

$$Qz = Q_{1Z} \times Nz \quad (5)$$

где: Qz– площадь одного зубца, *м*^{2}; Nz – количество зубцов под полюсом.

$$Q_{1Z} = la \times bz \quad (6)$$

где: bz – расчетная средняя ширина зубца, *м*. la – активная длина магнитопровода (без изоляции листов), *м*:

$$la = Kc \times l\text{р} \quad (7)$$

где: *К*с – коэффициент, учитывающий заполнение пакета магнитопровода сталью, зависящий от рода изоляции и толщины листов стали статора δ. При δ равной 0,5 и 0,35 *мм*. *К*с для лака – 0,93 и 0,9, оксидной пленки – 0,95 и 0,93.
Средняя ширина зуба определяется из выражения, *м*.:

$$bz = \frac{1}{3} \times (2 \times b'z + b''z) \quad (8)$$

где: b'z и b''z – ширина зуба в узком и широком местах, *м*.
Нахождение узкого и широкого места у зуба зависит от размеров магнитопровода и формы паза, поэтому вначале находятся размеры зуба у расточки статора b' а затем у его основания b''. Для профиля рис. 33 ширина зуба у расточки, *м*.:

$$bz' = \frac{\pi \times (D + 2 \times e + b')}{Z} - b' \quad (9)$$

ширина зуба у основания, *м*.:

$$bz'' = \frac{\pi \times (D + 2 \times h - b)}{Z} - b \quad (10)$$

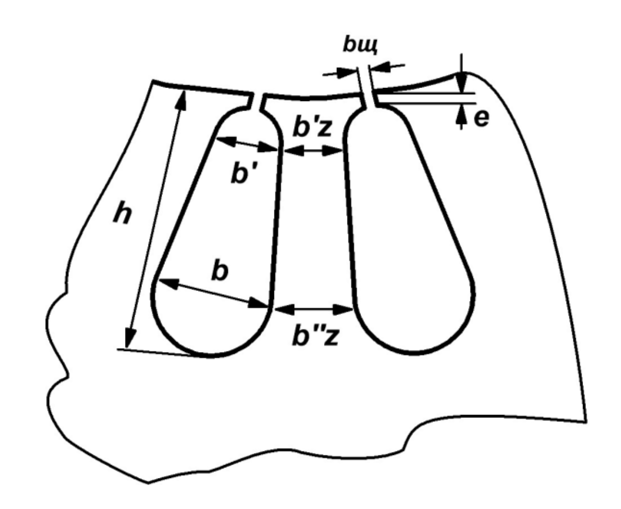


Рис. 33. Эскиз зубца магнитопровода асинхронного двигателя.

По полученным значениям b' и b'' находятся ширина зубца в узком месте b'z и в широком – b''z. Количество зубцов под полюсом определяется из выражения, шт.:

$$Nz = \frac{Z}{2 \times p} \quad (11)$$

Площадь спинки статора, перпендикулярная магнитному потоку Ф, равна произведению ее высоты hc на активную длину магнитопровода la, $м^2$:

$$Q\text{с} = hc \times la \quad (12)$$

$$hc = \frac{Da - (D + 2 \times h)}{2} \quad (13)$$

Площадь паза в свету требуется при расчете сечения обмоточного провода. В зависимости от профиля пазов магнитопроводов (рис. 32) после разбивки их площадей осевыми линиями на простые фигуры (по выше приведенному примеру) для определения указанных площадей (в $мм^2$) можно воспользоваться следующими выражениями:

профиль 1:

$$Q\text{п} = Qb' + Q_T + Q\text{пр} + Qr$$

где: Qb' – площадь полуокружности с диаметром b', который равен меньшему размеру ширины паза, *мм*^{2}:

$$Qb' = \frac{\pi \times b'^2}{8}$$

Qт – площадь трапеции, *мм*^{2}; с основаниями b и b' и высотой hт, *мм*.

$$h\text{т} = h - e - \frac{b'}{2} - r$$

тогда:

$$Q_T = \frac{b' + b}{2} \times h\text{т}$$

Qпр площадь прямоугольника, *мм*^{2}:

$$Q\text{пр} = (b - 2 \times r) \times r$$

Qr – площади четверти окружностей, закругления паза на углах с радиусами r, *мм*^{2}:

$$Qr = \frac{\pi \times r^2}{4}$$

Окончательно для профиля 1 формула площади паза в свету имеет вид, *мм*^{2}:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \times h\text{т} + (b - 2 \times r) \times r + 2 \times \frac{\pi \times r^2}{4}$$

Аналогично получены формулы площадей пазов для профилей всех остальных пазов (рис. 32) в *мм*^{2}. Профили от 2 до 8 имеют следующие виды выражений:

профиль 2:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \times h\text{т} + \frac{\pi \times b^2}{8}$$

hт – высота трапеции, *мм*.:

$$h\text{т} = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2}$$

профиль 3:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \times h\text{т}$$

hт – высота трапеции, *мм*.:

$$h\text{т} = h - e - \frac{b'}{2}$$

Профиль 4:

$$Q\text{п} = \frac{(b\text{ш} + b')}{2} \times h' + \frac{b' + b}{2} \times (h - e - h')$$

Профиль 5:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times (b')^2}{8} + b' \times \left(h - e - 2 \times \frac{b'}{2}\right) + \frac{\pi \times (b')^2}{8}$$

Профиль 6:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + b' \times \left(h - e - \frac{b'}{2} - r\right) + r \times (b' - 2 \times r) + 2 \times \frac{\pi \times r^2}{4}$$

Профиль 7:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times {b'}^2}{8} + b' \times \left(h - e - \frac{b'}{2}\right)$$

Профиль 8:

$$Q\text{п} = \frac{(b\text{ш} + b')}{2} \times h' + b' \times (h - e - h')$$

Пример. Определить площади магнитной цепи (рис. 31) и паза магнитопровода трехфазного асинхронного двигателя (рис. 32), профиль 2 (здесь и далее в задании приводятся только необходимые для примера данные).

Данные обмера магнитопровода и паза, *мм.*:

D = 110; Da = 191; l = 125; Z = 24; b = 12,6; b' = 10,5 bш = 3,5; h = 15,1; e = 0,5; δ = 0,35; род изоляции – лак. Технические условия заказчика следующие: n = 3000 *мин*$^{-1}$, Uф = 220 *в*, f = 50 *гц*; схема соединения обмоток – Y/△.

Решение:

1. Определяем площадь полюса в воздушном зазоре $Q\delta$. Для этого находим:
1. 1. Количество пар полюсов (4):

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{3000} = 1$$

следовательно, количество полюсов будет: 2p = 2 × 1 = 2 шт.;
1. 2. Полюсное деление (ширинf полюса в воздушном зазоре) (3)

$$\tau = \frac{\pi \times D}{2 \times p} = \frac{3{,}14 \times 0{,}11}{2} = 0{,}173\ \text{м}$$

1. 3. Расчетную длину сердечника статора (так как поперечные каналы для охлаждения магнитопровода отсутствуют) lр = l = 0,125 *м*.
1. 4. Площадь полюса в воздушном зазоре (2):

$$Q\delta = \tau \times l\text{р} = 0{,}173 \times 0{,}125 = 0{,}0216\ \text{м}^2$$

2. Определяем площадь полюса в зубцовой зоне Qz для этого находим:
2. 1. Активная длину магнитопровода при δ = 0,35 *мм.* и лаковой изоляции между листами электротехнической стали Kc = 0,9, тогда (7):

$$la = K\text{c} \times l\text{р} = 0{,}9 \times 0{,}125 = 0{,}1125\ \text{м}$$

2. 2. Ширина зуба у расточки сердечника АД (9) (рис. 33):

$$bz' = \frac{\pi \times (D + 2 \times e + b')}{Z} - b' = \frac{3{,}14 \times (0{,}11 + 2 \times 0{,}0005 + 0{,}0105)}{24} - 0{,}0105 = 0{,}0054\ \text{м.}$$

2. 3. Ширина зуба у основания сердечника АД (10):

$$bz'' = \frac{\pi \times (D + 2 \times h - b)}{Z} - b = \frac{3{,}14 \times (0{,}11 + 2 \times 0{,}0151 - 0{,}0126)}{24} - 0{,}0126 = 0{,}0041\ \text{м.}$$

2. 4. Средняя ширина зуба. Из выполненных расчетов зуба следует, что узкое его место будет у основания, а широкое – у расточки магнитопровода АД. Отсюда b'z = b''z и b''z = b'z. Тогда (8):

$$bz = \frac{1}{3} \times (2 \times b'z + b''z) = \frac{1}{3} \times (2 \times 0{,}0041 + 0{,}0054) = 0{,}0045 \text{ м.}$$

2. 5. Площадь одного зуба магнитопровода (6):

$$Q_{1Z} = la \times bz = 0{,}1125 \times 0{,}0045 = 0{,}00051 \text{ м}^2$$

2. 6. Количество зубцов под одним полюсом:

$$Nz = \frac{Z}{2p} - \frac{24}{2 \times 1} = 12$$

2. 7. Площадь полюса в зубцовой зоне (5):

$$Qz = Q_{1Z} \times Nz = 0{,}00051 \times 12 = 0{,}0061 \text{ м}^2$$

3. Определяем площадь магнитопровода в спинке статора для этого находим:
3. 1. Высоту спинки статора (13) (рис. 31):

$$hc = \frac{D\text{a} - (D + 2 \times h)}{2} = \frac{0{,}191 - (0{,}11 + 2 \times 0{,}0151)}{2} = 0{,}0254 \text{ м.}$$

3. 2. Площадь в спинке статора:

$$Qc = hc \times la = 0{,}0254 \times 0{,}1125 = 0{,}0029 \text{ м}^2$$

4. Вычисляем площадь паза магнитопровода в свету Qп для профиля 2 (рис. 32). Для этого сложную форму паза разделяем осевыми линиями на простые фигуры (две полуокружности и трапеции), отсюда находим:
4. 1. Площадь полуокружности с диаметром b':

$$Qb' = \frac{\pi \times b'^2}{8} = \frac{3{,}14 \times 10{,}5^2}{8} = 43{,}27 \text{ мм}^2$$

4. 2. Высоту трапеции:

$$h\text{т} = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2} = 15{,}1 - 0{,}5 - \frac{12{,}6}{2} - \frac{10{,}5}{2} = 3{,}05 \text{ мм.}$$

4. 3. Площадь трапеции:

$$Q_\text{т} = \frac{b' + b}{2} \times h\text{т} = \frac{12{,}6 + 10{,}5}{2} \times 3{,}05 = 35{,}22 \text{ мм}^2$$

4. 4. Площадь полуокружности с диаметром b:

$$Qb' = \frac{\pi \times b^2}{8} = \frac{3{,}14 \times 12{,}6^2}{8} = 62{,}3 \text{ мм}^2$$

4. 5. Площадь паза в свету:

$$Q\text{п} = Q_\text{т} + Qb' + Qb = 43{,}27 + 35{,}22 + 62{,}3 = 140{,}79 \text{ мм}^2$$

Для подытоживания расчетов площадей магнитной цепи полезно анализировать результаты путем их сопоставления. Величина площади полюса в зубцовой зоне должна составлять около половины ее площади в воздушном зазоре. В случае, если частота вращения, заданная заказчиком, соответствует частоте вращения поля статора на которую изначально рассчитан асинхронный двигатель, площадь полюса в зубцовой зоне резко не отличается от двойной ее величины в спинке статора.

10. 2. Выбор типа обмотки.

Выбор делается исходя из экономической целесообразности, минимального расхода обмоточного провода, номинальных мощности и напряжения, формы паза, достоинств и недостатков рассматриваемых обмоток, технической возможности выполнения обмотки. Схемы статорных обмоток трехфазных электрических машин разделяют по:

⇒ числу активных сторон секций в пазу на: *одно* – (у которых активная сторона одной и той же катушки занимает весь паз) и *двухслойные* (активная сторона занимает половину паза);
⇒ размеру шага на: обмотки с *полным шагом* (при $y = y'$) и с *укороченным шагом* (при $y < y'$);
⇒ частоте вращения магнитного поля статора на: *одно* – и *многоскоростные*,
⇒ числу секций в катушечных группах (фазных катушек) на: обмотки с одинаковым числом секций в группе (q равно *целому* числу) и разным (q равно *дробному* числу).
По способу выполнения обмоток их еще разделяют на:

⇒ *шаблонно–рассыпные* (или *всыпные*), они же называются и обмотками с мягкими секциями. У таких обмоток секции укладываются по одному проводнику через прорезь (шлиц) полузакрытого паза. Применяются для машин малой и средней мощности напряжением до 500 *в*;
⇒ *протяжные*, выполняются протяжкой провода через пазы с торца. Используются для машин напряжением до 10000 *в* при закрытых или полузакрытых пазах. Способ укладки обмотки трудоемок, в настоящее время используется в основном при частичном ремонте обмоток;
⇒ *обмотки с жесткими секциями*. Готовые, изолированные, секции, несущие на активных частях пазовую изоляцию, укладываются в открытые пазы. Используются для машин средней и большой мощности с напряжением до 10000 *в* (и более).
По способу размещения секций катушечных групп в расточке статора, а также размещения их лобовых частей обмотки подразделяются на:
⇒ *концентрические*, с размещением секций (катушек) одну внутри другой и расположением лобовых частей в двух или трех плоскостях. Такие обмотки выполняются обычно вразвалку;
⇒ *шаблонные*, с одинаковыми секциями катушечных групп. Они могут выполняться *простыми* и *вразвалку*. Если в шаблонной однослойной обмотке развалку выполнить не по полугруппам, а по отдельным катушкам, получим схему цепной обмотки.

Однослойные обмотки главным образом выполняются петлевыми, простыми шаблонными, шаблонными "вразвалку", цепными, концентрическими.

Основные достоинства однослойной обмотки по сравнению двухслойной:
1. Отсутствие межслоевой изоляции, что повышает коэффициент заполнения паза, а, следовательно, ток и мощность двигателя.
2. Простота изготовления.
3. Большая возможность применения автоматизации при укладке обмоток.

Основные недостатки однослойной обмотки:
1. Повышенный расход проводникового материала.
2. Сложность укорочения шага, а, следовательно, компенсации высших гармоник магнитного потока.
3. Ограниченные возможности построения обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.
4. Более трудоемкое изготовление и монтаж катушек для крупных электродвигателей высокого напряжения.

Двухслойные обмотки в основном выполняются с одинаковыми секциями, петлевые, цепные, реже делаются концентрические.
Основные достоинства двухслойной обмотки по сравнению с однослойной:
1. Возможность любого укорочения шага, что позволяет:
а) снизить расход обмоточного провода за счет уменьшения длины лобовой части секций.
б) уменьшить высшие гармонические составляющие магнитного потока, т. е. снизить потери в магнитопроводе двигателя.
2. Простота технологического процесса изготовления катушек (многие операции можно механизировать).
3. Возможность выполнения обмотки почти с любой дробностью q, что обеспечивает изготовление обмотки при ремонте асинхронных двигателей с изменением частоты вращения ротора. Кроме того, это является одним из способов приближения формы поля к синусоиде.
4. Возможность образования большего числа параллельных ветвей.

Основные недостатки двухслойной обмотки:
1. Меньший коэффициент заполнения паза (вследствие наличия межслоевой изоляции).
2. Некоторая сложность при укладке последних секций обмотки.
3. Необходимость поднимать целый шаг обмотки при повреждении нижней стороны секции.

В настоящее время в ремонтной практике машин переменного тока наиболее распространены двухслойные обмотки. Они дают возможность (особенно при укороченном шаге) сократить до минимума, по сравнению с другими типами обмоток, расход обмоточного провода на единицу мощности АД. Обладают такими существенными достоинствами, как простота технологии изготовления, высокая степень компенсации гармонических составляющих магнитного потока и пр. К сказанному следует добавить, что *двухслойные обмотки без укорочения шага практически не делаются.*

10. 3. Расчет обмоточных данных.

Полная обмотка асинхронного двигателя, размещенная в магнитопроводе его статора, состоит из 3–х самостоятельных фазных обмоток (А, В и С), каждая из которых имеет свои выводы, соответственно, С1–С4; С2–С5 С3–С6, из них С1, С2, С3 – начало, С4, С5 С6 – концы. Каждая фазная обмотка состоит из *фазных катушек*, или иначе *катушечных групп*, соединенных последовательно, параллельно или комбинированно. Катушечную группу нередко называют еще *полюсной группой*. *Катушкой* называются витки, имеющие общую ось. Под катушечной группой понимается ряд последовательно соединенных между собой секций, принадлежащих одной фазе в одной паре полюсов.
Секция является частью катушечной группы и представляет собой катушку из обмоточного провода, число витков которой определяете специальным расчетом, минимальное число равно одному витку.

Каждый виток (а следовательно, секция) состоит из *двух активных* проводников (сторон), уложенных в пазы магнитопровода статора двигателя, и *двух лобовых* частей, соединяющих эти активные проводники. Активными они являются потому, что именно в них магнитный поток машины Ф индуктирует ЭДС (в отличие от лобовых).
Полюсом в общем случае называют сечение ферромагнитного материала, через которое магнитный поток переходит из одной среды в другую, например, из сердечника электромашины в воздух.
В расточке статора асинхронного двигателя полюсом принято называть часть магнитопровода, охватывающую рядом расположенные пазы, в которых активные проводники обмотки имеют одно и то же направление тока.
В создании полюса участвуют все три фазы тока, следовательно, в каждом должны быть их фазные катушки.
Любой тип обмотки трехфазной машины переменного тока характеризуется следующими обмоточными данными: N – число катушечных групп; y – шаг обмотки; q – число пазов на полюс и фазу (равно числу секций в катушечной группе); α – число электрических градусов, приходящихся на один паз; a – число параллельных ветвей.

Число катушечных групп (N).

Поскольку в витке ток в активных проводниках направлен встречно, каждая фазная катушка обмотки участвует в создании пары полюсов. Следовательно, между числом катушечных групп и числом пар полюсов имеется жесткая связь и для однослойной обмотки:

$$N_{1ф}^{(1)} = p \quad (14)$$

где $N_{1ф}^{(1)}$ – число катушечных групп в одной фазе однослойной обмотки, шт.
А так как каждую пару полюсов создают все три фазы переменного тока, следовательно, число катушечных групп обмотки асинхронного двигателя естественно увеличивается в m (3) раз:

$$N_{3ф}^{(1)} = p \times m \quad (15)$$

В двухслойных обмотках число катушечных групп механически увеличивается в два раза (фазные катушки однослойной обмотки по всем секциям разделяют пополам), поэтому в каждой секции число витков будет в два раза меньше, число же катушечных групп в два раза больше, следовательно, шт.:

$$N_{1ф}^{(2)} = 2 \times p \quad (16)$$

где $N_{1ф}^{(2)}$– число катушечных групп в одной фазе двухслойной обмотки. На три фазы:

$$N_{3ф}^{(2)} = 2 \times p \times m \quad (17)$$

Шаг обмотки (y).

Ток, протекающий по виткам катушки, внутрь которой вставлен ферромагнитный стержень, создает в нем магнитный поток. В магнитопроводе АД секции (катушки) уложены в пазы, охватывающие стальные зубцы, поэтому текущий в них ток в воздушном зазоре создает полюс. Следовательно, активные стороны секций смещены в расточке статора на расстояние полюса.
Отсюда шаг обмотки (y) – расстояние, выраженное в зубцах (или пазах), между активными сторонами одной и той же секции, он определяется по формуле:

$$y' = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon \quad (18)$$

где y'– расчетный шаг (равен полюсному делению, выраженном в зубцах); ε – произвольное число меньше 1 доводит расчетный шаг (y) до целого значения.
Если между активными сторонами секции помещается полюс такой шаг (y) называется *полным* или *диаметральным*, если же меньше размера полюсного деления ($y < y'$), – *укороченным*. На практике принято шаг определять в пазах, поэтому при раскладке вторая сторона секции ложиться в паз $y + 1$.

Число пазов на полюс и фазу (q).

Находится для того, чтобы определить число секций в катушечной группе. Действительно если в полюсе на одну фазу приходится более одного паза, витки фазной сосредоточенной катушки разделяют на количество секций, равное, шт.:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} \quad (19)$$

m – число фаз. При $q = 1$ в полюсе статора на одну фазу приходится только один паз, значит катушка этой фазы не может быть разделена на секции. Такая обмотка называется сосредоточенной.
При $q > 1$ обмотка называется *рассредоточенной*, при этом фазные катушки должны быть разделены на секции, число которых равно q. При $q = 2$ катушечная группа будет состоять из двух секций, при $q = 3$ – из трех и т. д. Суммарное число витков этих секций равно числу витков сосредоточенной фазной катушки.

Число электрических градусов на один паз (α).

В расточке статора асинхронного двигателя распределение магнитного потока по одной парой полюсов подчиняется синусоидальному закону, т. е. по краям полюсов магнитных силовых линий нет, при приближении к центру число их плавно возрастает и в центре полюса достигает максимума. Это показывает изменение ЭДС (e) в проводнике, если его провести (или сделать один оборот ротора) под одной парой полюсов.
Известно, что $e = B \times l \times v$, где B – магнитная индукция, l – длина проводника, v – скорость его движения. Отсюда, при постоянных l и v изменение величины *e зависит только от изменения величины B* (рис. 34, а).
Тогда при перемещении проводника под одной парой полюсов в нем происходит полный цикл изменения величины e, следовательно также меняется и магнитный поток (и индукция – B). Синусоида делится на 360 градусов, т. е. на одну пару полюсов приходится 360 электрических градусов (эл. гр.).
При движении проводника под двумя парами полюсов (за один оборот) (рис. 34, б) ЭДС в нем изменится два раза по 360 эл. гр. (360 × 2 = 720 эл. гр.), т. е. в общем случае в любой машине число электрических градусов в расточке статора можно определить по формуле:

$$360 \times p$$

Если в магнитопроводе число пазов равно Z, то число электрических градусов, приходящихся на один паз, или угловой сдвиг между рядом лежащими пазами α равен:

$$\alpha = \frac{360 \times p}{Z} \quad (20)$$

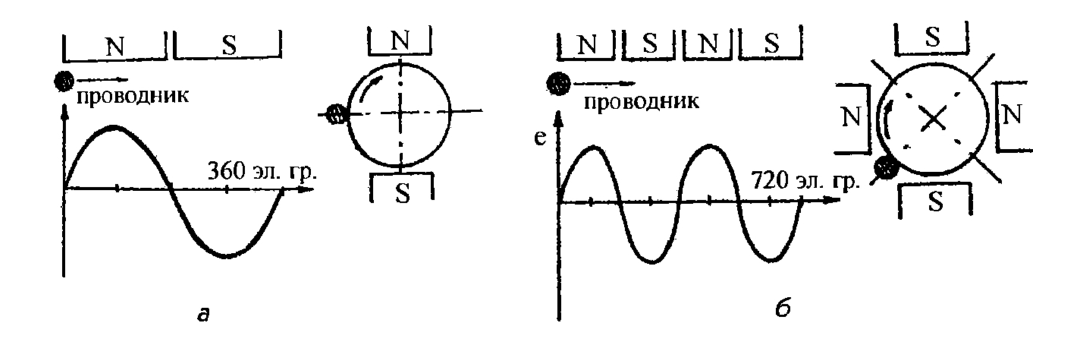


Рис. 34. Зависимость числа электрических градусов в расточке статора электромашины от одной (а) или двух (б) пар полюсов.

Число параллельных ветвей (*a*).

Параллельные ветви в обмотке асинхронного двигателя делаются для сокращения сечения обмоточного провода, кроме того, в определенной мере, это дает возможность лучше загрузить магнитную систему машины.

Все катушечные группы обмотки одной фазы могут быть соединены последовательно, как это показано на рис. 35, а. В этом случае *число параллельных ветвей* равно 1 (a = 1), буквами Н, К и цифрами обозначены соответственно начала и концы фазных катушек.

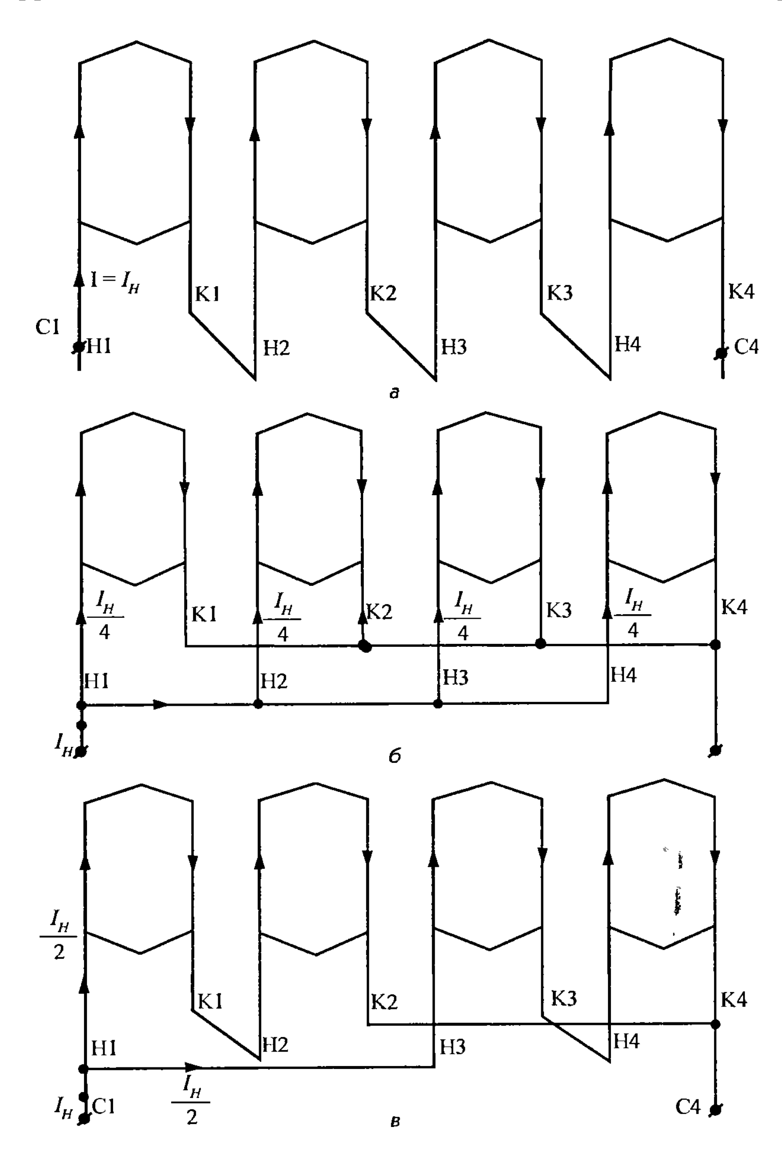


Рис. 35. Катушечные группы обмотки одной фазы, включенные в одну (а), четыре (б), две (в) параллельные ветви.

При параллельном включении катушечных групп число параллельных ветвей равняется числу фазных катушек в обмотке одной фазы $N_{1Ф}$ (рис. 35, б, a = 4).
Можно катушечные группы обмотки одной фазы соединять и комбинированно (часть последовательно и часть параллельно), как показано на рис. 35, в, a = 2, но при этом в любом случае число катушечных групп в каждой параллельной ветви должно быть строго одинаковым.
Решение о рациональном числе параллельных ветвей принимается только после разделения обмоточного провода на *параллельные сечения*.
Рассчитанные обмоточные данные используются по приведенным ниже методикам, в частности, для построения однослойных и двухслойных петлевых обмоток. Отличия в исполнении других обмоток незначительны.

10. 4. Принципы построения схем статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя.

Для получения вращающегося магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя при любой схеме обмотки требуется:
1) смещение в пространстве расточки статора АД фазных обмоток одна относительно другой на 120 эл. гр.
2) смещение во времени токов, протекающих по этим обмоткам, на одну треть периода (*следовательно, векторы, изображающие указанные токи на плоскости, будут сдвинуты на 120 эл. гр.*).
Первое условие выполняется соответствующей укладкой катушечных групп трехфазной обмотки, второе – подключением асинхронных двигателей к сети трехфазного тока, в которой временной сдвиг между напряжениями трех фаз обеспечивается генераторами электрических станций. Эти напряжения в замкнутых цепях обмоток машин создают нужный сдвиг токов.

Построение однослойной обмотки.

Пусть статор имеет количество пазов магнитопровода Z = 24. Технические требования заказчика: частота вращения поля n = 1500 *мин*$^{-1}$, частота тока f = 50 *гц*.

1 2 3 4 5 6

Рис. 36. Размещение первой активной стороны секции в магнитопроводе.

При построении схемы обмотка первой фаз может в общем начинаться с любого паза. В нашем случае первую активную сторону секции помещаем в первый паз (рис. 36).
Определяем число пар полюсов по формуле (4):

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$$

а) Находим шаг обмотки (секции) по формуле (18)

$$y' = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{24}{2 \times 2} = 6$$

Следовательно, при y = y' вторую активную сторону секции помещаем через шесть зубцов в седьмой паз (рис. 37), y + 1 = 6 + 1.

б) Определяем число пазов на полюс и фазу по формуле (19):

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{2 \times 2 \times 3} = 2$$

Отсюда одна катушечная группа имеет две секции, тогда вторая секция занимает соответственно пазы 2 и 8 (рис. 38).

в) Число катушечных групп в однослойной обмотке одной фазы определим по формуле (14):

$$N_{1\text{ф}}^{(1)} = p = 2$$

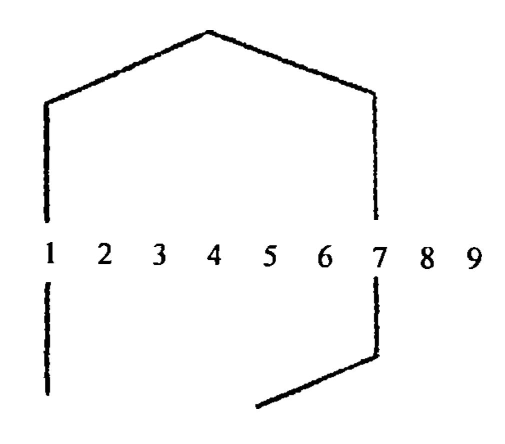


Рис. 37. Размещение второй активной стороны секции в магнитопроводе.

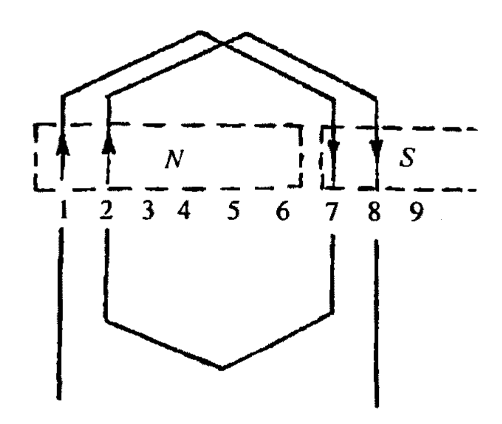


Рис. 38. Размещение в магнитопроводе первой катушечной группы обмотки.

г) В какие пазы укладывается вторая катушечная группа той же самой фазы $N_{1\text{ф}}^{(1)}$?

В однослойной обмотке первая катушечная группа участвует в создании первой пары полюсов (рис 38), вторая должна создавать вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно быть равно одной паре полюсов, т. е. 360 эл. гр. Отсюда сдвиг между катушечными группами одной фазы в пазах будет:

$$A \to \frac{360}{\alpha}$$

где: α – число электрических градусов на один паз. Рассчитывается по формуле (20):

$$\alpha = \frac{360 \times p}{Z} = \frac{360 \times 2}{24} = 30 \text{ эл. гр.}$$

тогда:

$$A \to \frac{360}{\alpha} = \frac{360}{30} = 12 \text{ пазов}$$

Отсюда вторая катушечная группа фазы "А" начинается с 13 паза (рис. 39).

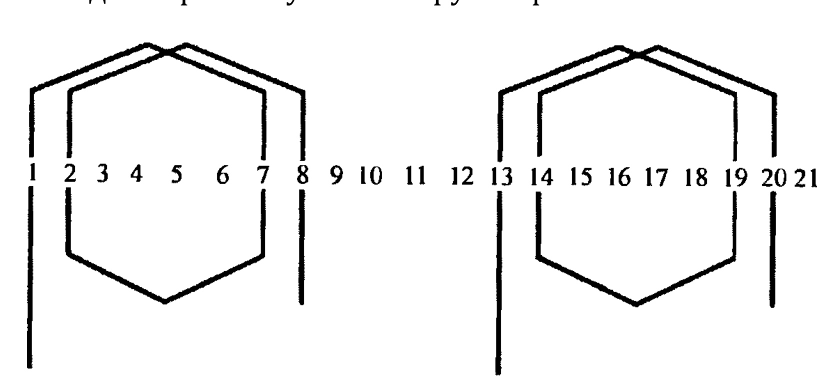


Рис. 39. Размещение катушечных групп обмотки одной фазы.

д) Как соединить между собой уложенные катушечные группы?
Чтобы ответить на этот вопрос, вначале необходимо принять число параллельных ветвей (a), которое далее уточняется после расчета сечения обмоточного провода (Пр). В предварительном расчете число параллельных ветвей можно брать произвольно, их максимальное количество, как указывалось, допустимо брать равным числу катушечных групп в одной фазе ($N_{1ф}^{(1)}$). Однако пока неизвестно (Пр), рационально ли принимать a = 1. Затем необходимо показать направления токов в активных проводниках катушек исходя из закона чередования полюсов.
Если в машине 4 полюса (рис. 40), то по направлению тока и можно соединить, только следующим образом: конец первой катушечной группы – с началом второй, что является законом для однослойных обмоток.

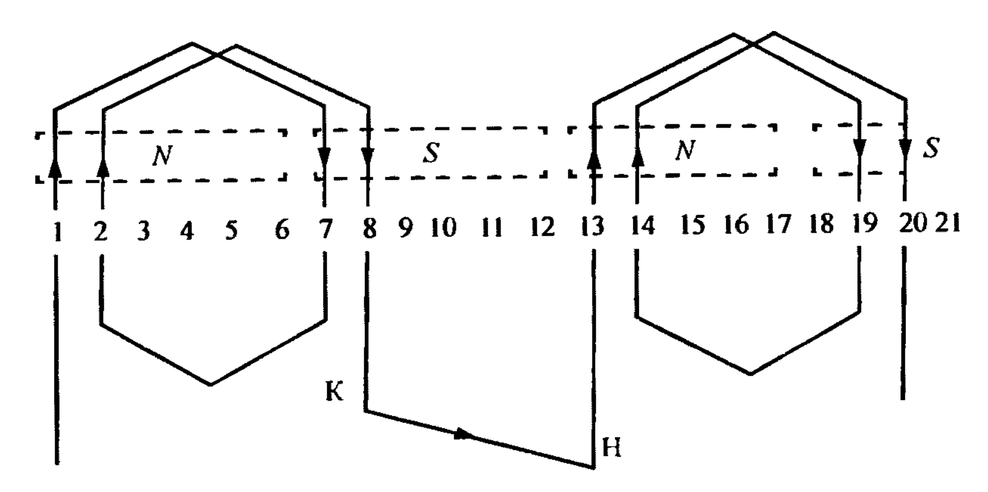


Рис. 40. Направление токов в активных сторонах секции уложенных катушечных групп обмотки одной фазы и их соединение.

Обмотки фаз В и С выполняются аналогично, но согласно условию получения вращающегося магнитного поля, в расточке статора, они сдвинуты соответственно на 120 и 240 эл. гр. относительно обмотки фазы А, т. е. в пазах это будет:

$$B \to \frac{120}{\alpha} = \frac{120}{30} = 4 \qquad C \to \frac{240}{\alpha} = \frac{240}{30} = 8$$

Следовательно, обмотки фаз B и C начинаются соответственно в 5–м и 9–м пазах. Укладка их катушечных групп аналогична обмотке фазы A. В результате получаем обмотку асинхронного двигателя (рис. 41).

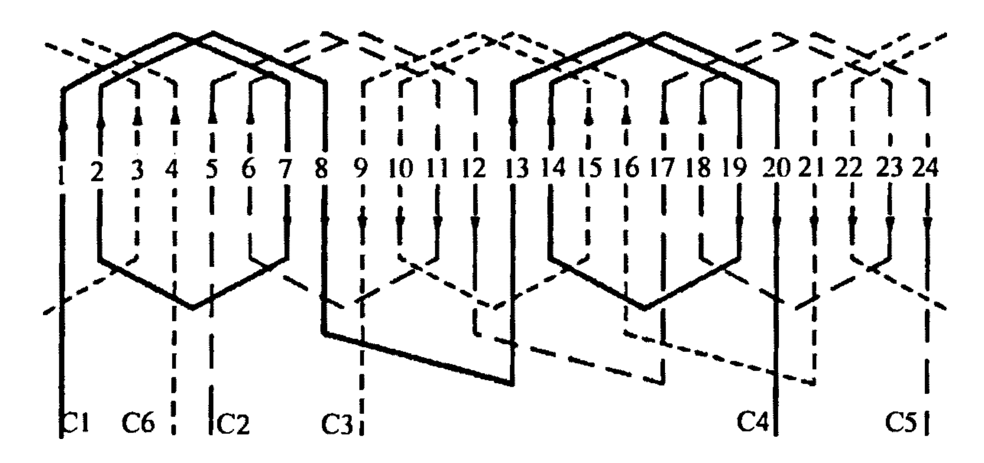


Рис. 41. Развернутая схема однослойном статорной обмотки при $N_{3Ф}^{(1)}$ = 6, y = 6, q = 2, α = 30°; a = 1

е) Как определить полюса в расточке статора?

Направления токов – в активных проводниках обмоток, а значит и положение полюсов в расточке статора могут быть показаны только для данного момента t. Оно берется произвольно. Принятому t_1, на развертке $I = f(t)$ (рис. 42, а) соответствует векторная диаграмма токов (рис. 42, б). Из последней следует, что в момент t_1, токи в обмотках фаз A и B текут в одном направлении, а в обмотке фазы C – в противоположном, причем сумма первых (Ia + Ib) равна Ic (закон Кирхгофа).

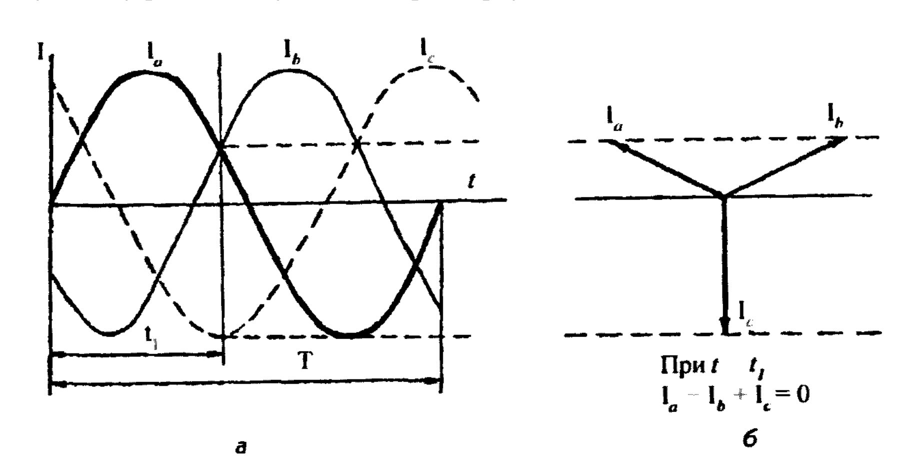


Рис. 42. Развертка зависимости токов от времени (а) $I = f$(t)
и векторная диаграмма токов (б) для t_1.

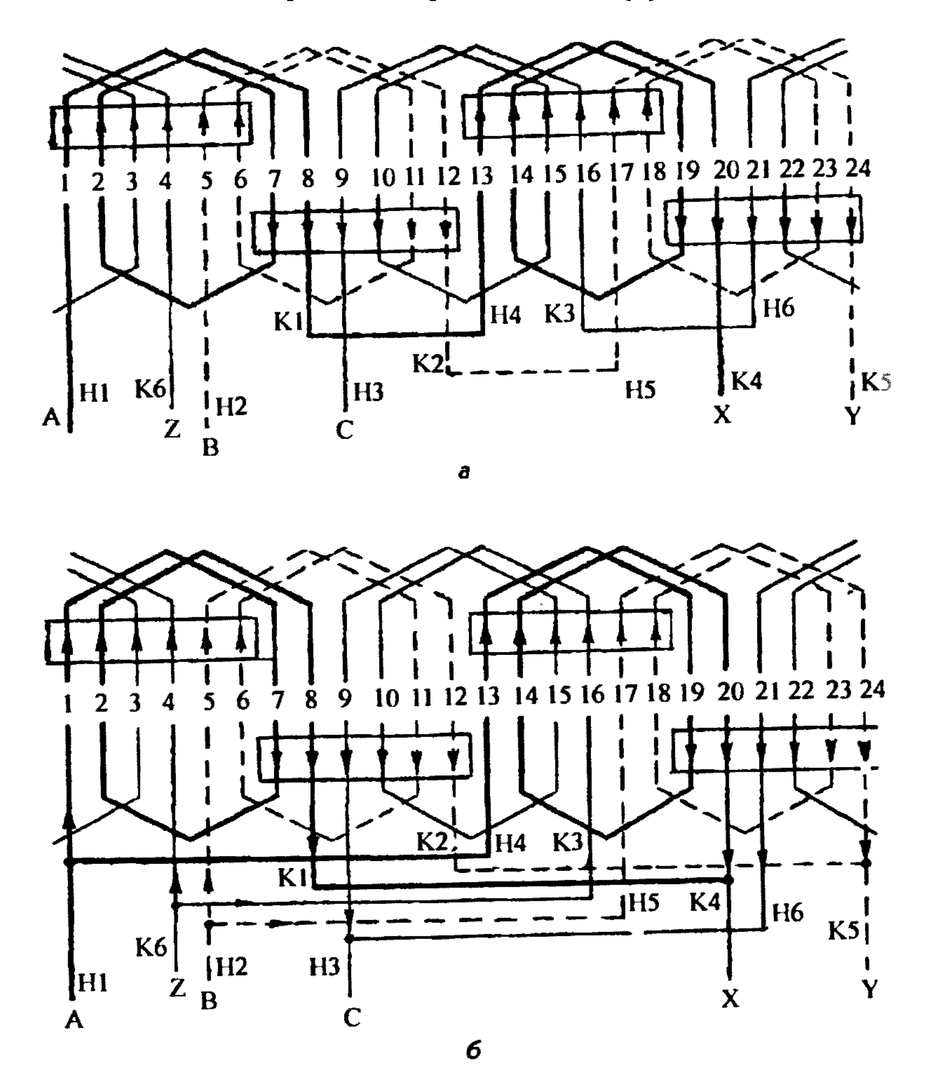


Рис. 43. Развернутая схема однослойной статорной обмотки с положением полюсов, соответствующих времени t_1, при a = 1 (а) и 2 (б), $N_{3Ф}^{(1)} = 6$; $y = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30°$

Расстановка токов в активных проводниках по пазам расточки статора в соответствии с векторной диаграммой (рис. 43, а) и (рис 43, б) дает возможность найти положение полюсов для принятого времени t_1.

Построение двухслойной обмотки.

В отличие от однослойных в двухслойных обмотках катушечных групп в два раза больше (16):

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2p = 4$$

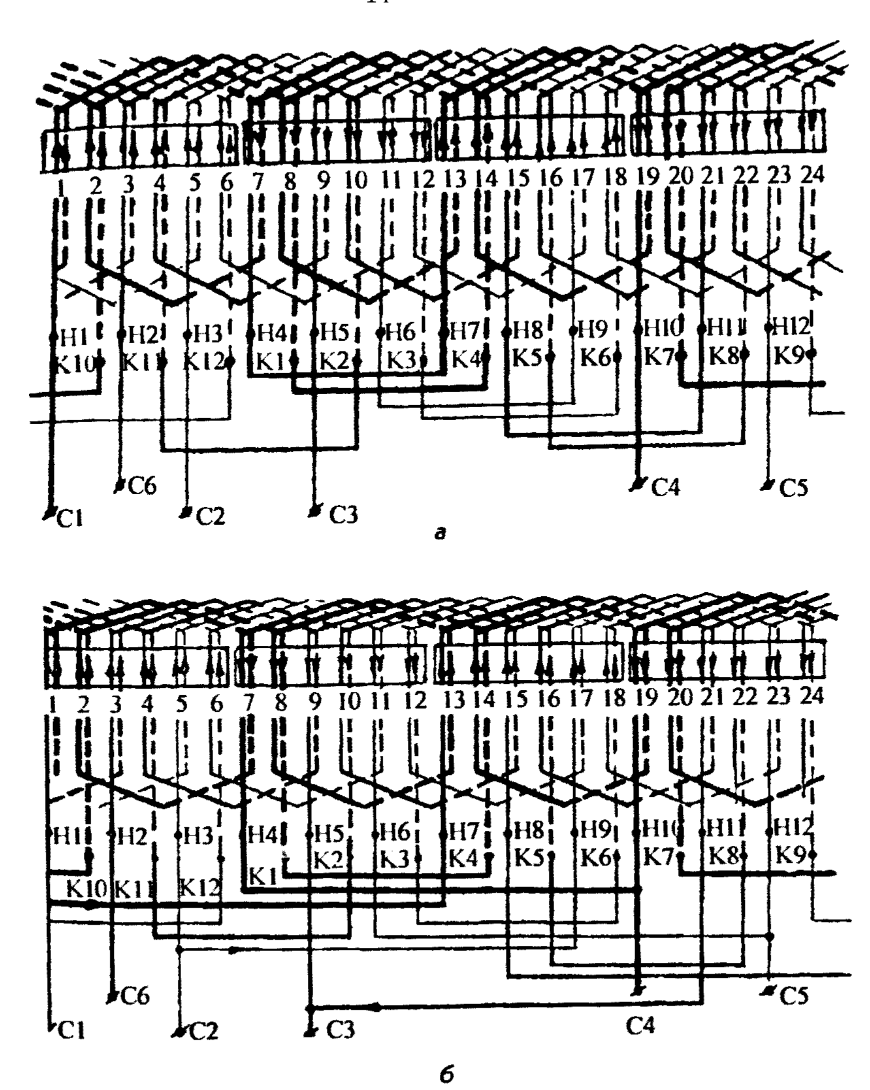


Рис. 44. Развернутая схема двухслойной статорной обмотки при $N_{3\Phi}^{(2)} = 12$, $y = 6$, $q = 2$, $\alpha = 30°$, $a = 1$ (а) и 2 (б)

Кроме того, у одной и той же фазы они сдвигаются не на 360 эл. гр. (как в однослойных обмотках), а на 180 (!). Соединяются они между собой – конец предыдущей катушечной группы с концом последующей, а начало – с началом (этого требует направление токов (рис. 44, а, б). Отсюда общее число катушечных групп в обмотке равно (17):

$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2pm = 12$$

Все остальные обмоточные данные находятся по тем же выражениям, как и для однослойных обмоток: шаг обмотки (18) $y = 6$, число пазов на полюс и фазу (19) $q = 2$, число эл. гр. приходящихся на один паз (20) $\alpha = 30$ эл. гр., число параллельных ветвей $a = 1$.

Построение двухслойной обмотки (рис. 44, а, б) принципиально ничем не отличается от однослойной и выполняется по следующим этапам: укладываются секции катушечных групп всех трех фаз; проводится соединение этих групп в обмотки с требуемым числом параллельных ветвей; для принятого t_1 (рис. 42) показываются направление фазных токов в расточке статора, находится положение полюсов.

10. 5. Расчет числа витков в обмотке одной фазы и в одной секции.

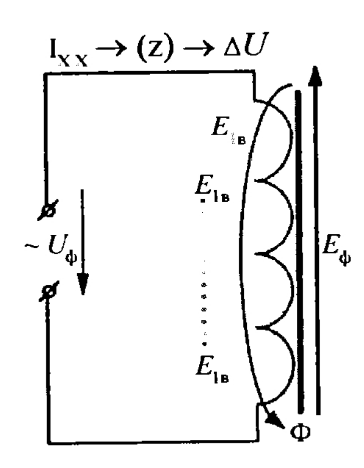


Рис. 45. Принципиальная схема работы асинхронного двигателя.

При подаче напряжения Uф на обмотку по ней потечет ток холостого хода Iхх (рис. 45). Так как напряжение изменяется по синусоидальному закону, ток тоже будет переменным. Он создаст в магнитной системе машины магнитный поток Ф который также будет переменным. Поток Ф индуктирует в витках обмотки, которая его создала, ЭДС (Eф), направленную встречно приложенному напряжению (закон электромагнитной индукции).

ЭДС фазной обмотки Eф будет слагаться из суммы ЭДС отдельных витков $E_{1В}$, *в*.

$$Eф = \Sigma E_{1В} \quad \text{или} \quad Eф = E_{1В} \times Wф \quad (21)$$

где Wф – количество витков в обмотке одной фазы.

Кроме того, ток Iхх создает на активном и реактивном сопротивлениях обмотки r и x падение напряжения $\Delta U = I \times r_1 + I \times x_1$. Таким образом, приложенное к обмотке напряжение Uф уравновешивается ЭДС Eф и падением напряжения в обмотке ΔU. Математически в векторной форме все сказанное приведено на упрощенной векторной диаграмме асинхронного двигателя (рис. 46). Для наглядности рядом показана фактическая векторная диаграмма электромашины, при этом Uф = U_1, а Eф = E_1
Из изложенного (21) и векторной диаграммы следует:

$$Wф = \frac{Eф}{E_{1В}} \quad (22)$$

где $E_{1В}$ – ЭДС одного витка обмотки, *в*.
Падение напряжения ΔU в обмотке АД приблизительно составляет 2,5 – 4,0% от Uф (в среднем около 3%). Отсюда без ущерба для точности расчета можно записать:

$$Eф = 0{,}97 \times Uф \quad (23)$$

где Eф – ЭДС обмотки фазы, *в*; Uф – фазное напряжение, *в.*
Учитывая выражение (23), уравнение (22) примет вид:

$$Wф = \frac{0{,}97 \times Uф}{E_{1ф}} \quad (24)$$

Мгновенное значение ЭДС одного витка, как известно из теоретической электротехники, определяется из выражения:

$$e_{1В} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (25)$$

t – время, *сек*.

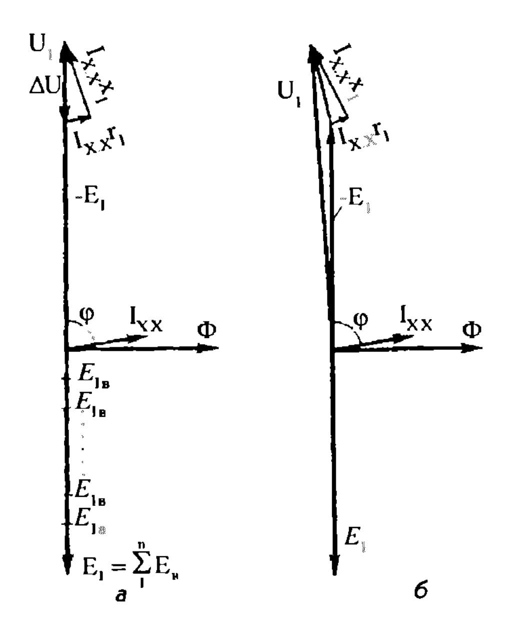


Рис. 46. Векторные диаграммы асинхронного двигателя:
упрощенная (а), фактическая (б).

Магнитный поток изменяется по закону:

$$\Phi = \Phi m \times sin\omega t \quad (26)$$

где Фm – амплитудное значение магнитного потока, *Вб*, ω – угловая частота вращения поля. Подставив уравнение (26) в (25) и взяв производную, получим:

$$e_{1\Phi} = -\omega \times \Phi m \times cos\omega t = \omega \times \Phi m \times \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Максимальное значение ЭДС одного витка будет при:

$$\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 1$$

тогда (так как ω = 2π × *f*):

$$E_{1Вm} = \omega \times \Phi m = 2\pi \times f \times \Phi m$$

Действующее значение отличается от максимального на $\sqrt{2}$ значит:

$$E_{1В} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times f \times \Phi m$$

У асинхронного двигателя обмотка редко бывает сосредоточенной, чаще всего $q > 1$. При этом часть магнитного потока Ф рассеивается, что учитывается *коэффициентом распределения* $К$р:

$$Кр = \frac{\sin\left(\alpha \times \frac{q}{2}\right)}{q \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (27)$$

Практически все двухслойные обмотки выполняются только укороченным шагом. Это приводит к тому, что на границах полюсов в секциях разных фаз, лежащих в одном пазу, направление токов будет встречное. Следовательно, суммарный магнитный поток от этих секций будет равен нулю, что уменьшает общий магнитный поток Ф. Это явление учитывается коэффициент укорочения *К*у.
Для получения наиболее рационального Ку, при котором обеспечивается подавление высших гармоник магнитного потока, наиболее искажающих форму кривой его изменения, рекомендуется коэффициент укорочения шага брать равным 0,8. Отсюда шаг *y* = 0,8 × *y*'. Следовательно, *К*у можно определить из выражения:

$$Ку = sin\left(90 \times \frac{y}{y'}\right) \quad (28)$$

Для удобства расчетов пользуются произведением этих коэффициентов, которое называется обмоточным коэффициентом *К*об:

$$Коб = Кр \times Ку \quad (29)$$

Тогда окончательно ЭДС одного витка равна:

$$E_{1В} = 4{,}44 \times f \times Ф \times Коб \quad (30)$$

Подставляя выражение (30) и (23) в (22), получим:

$$Wф = \frac{0{,}97 \times Uф}{4{,}44 \times f \times Ф \times Коб} \quad (31)$$

В выражении (31) *U*ф и *f* заданы заказчиком, следовательно, для расчета *W*ф требуется знать лишь магнитный поток Ф. Последний под полюсом распределяется неравномерно (рис. 47). Однако при равенстве площадей прямоугольника со стороной *В*ср и полусинусоиды с максимальным значением *В*δ величина магнитного поля Ф под полюсом будет одинаковой. Значит:

$$Вср = \frac{Bδ}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} \times Bδ \quad (32)$$

где: 2/π – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока под полюсом; *В*ср – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, *Тл*.; *В*δ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, *Тл*. (табл. 10. 1).

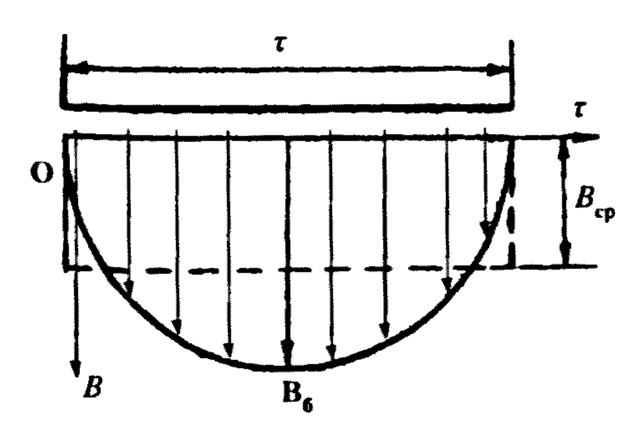


Рис. 47. Распределение *В* под полюсом в воздушном зазоре.

Таблица 10. 1. Нормированные электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей.

Наименование	Мощность, *кВт*		
	до 1	1–10	10–100
Индукция в воздушном зазоре ($B\delta$) *Тл.*	0,3–0,6	0,6–0,7	0,7–0,9
Индукция в зубцах статора (Bz) *Тл.*	1,3–1,5	1,4–1,6	1,4–1,8
Индукция в спинке статора (Bc) *Тл.*	1,1–15	1,2–1,6	1,3–1,6
Плотность тока в обмотке статора (j), $А/мм^2$	однослойная		
	5,5–6,5	4,5–5	3,5–3,8
	двухслойная		
	6–8	5,5–6	4–4,5
Допустимая линейная нагрузка (Aдоп), $А/м\times10^3$	однослойная		
	10,0–14,0	18,0–22,5	24,0–30,0
	двухслойная		
	15,0–20,0	25,0–30,0	32,5–40,0

1. Однослойные обмотки, как правило, не дают возможности укорачивать шаг для подавления высших гармоник – Ф. Это ведет к дополнительному нагреву стали магнитопровода (по сравнению с двигателями, у которых двухслойная обмотка имеет укороченный шаг). Исходя из сказанного для электрической машины с однослойной обмоткой магнитные индукции на всех участках магнитной цепи берутся ближе к нижнему пределу, для двухслойных – к большему.
2. Если асинхронный двигатель работает в помещениях с постоянно повышенной температурой, следует брать магнитные индукции ($B\delta$, Bz, Bc) ближе к нижнему пределу.
3. При всех равных условиях от магнитопровода электромашины требуется получить максимальную мощность, которую она может дать (т. е. наиболее допустимый магнитный поток). Отсюда величина магнитного потока ($B\delta$) находится по формуле:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta \quad (33)$$

где $Q\delta$ – площадь полюса в воздушном зазоре, $м^2$.

Расчет оптимального числа витков в обмотке одной фазы.

Цель – определение рационального числа витков в равносекционной обмотке одной фазы асинхронного двигателя – W'ф, при котором величины магнитных нагрузок ($B\delta$, Bz, Bc) будут оптимальны на всех участках магнитной цепи. Такой расчет выполняется *методом подбора*.
Полученная по формуле (33) величина магнитного потока Ф требует уточнения, так как, будучи подставленной в формулу (31), дает, как правило, дробное число витков в обмотке или такое, при котором они не могут быть разложены равномерно по секциям фазных катушек.
Естественно, такая обмотка невыполнима, потому что, с одной стороны, часть витка в пазы уложить нельзя, с другой, секции в ней имеют разное число витков. Получение же нужной величины магнитного потока возможно, поскольку допустимые пределы магнитной индукции в воздушном зазоре $B\delta$ (табл. 10.1) позволяют взять ее такой, при которой обмотка будет *равносекционной*, т. е. с одинаковым числом витков в каждой секции.

Условие равносекционности обмотки вытекает из выражения числа активных проводников в одном пазу, шт.:

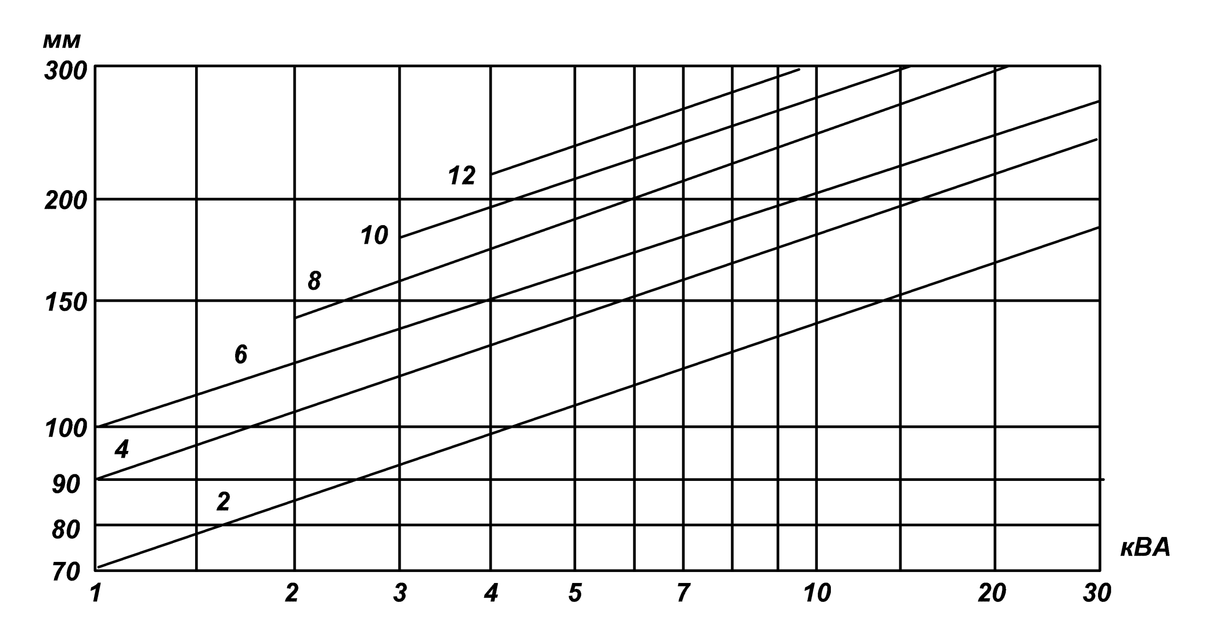
$$N\text{п} = \frac{2 \times W\text{ф} \times m \times a}{Z} \quad (34)$$

где: a – число параллельных ветвей.

Виток имеет два активных проводника, тогда 2 × Wф × m × a – полное число активных проводников в обмотке АД.

Чтобы число витков в секциях обмотки было одинаковым, необходимо число активных проводников в пазу Nп округлить, при этом для однослойной обмотки просто до целого значения, а для двухслойной – до целого и четного.

Для выбора $B\delta$ приблизительную полную мощность асинхронного двигателя (в *кВА*) можно определить по монограмме в зависимости от D.



Зависимость мощности асинхронного двигателя от внутреннего диаметра статора при разном количестве полюсов.

После округления Nп уточняется число витков в фазе , W''ф:

$$W''\text{ф} = \frac{N\text{п} \times Z}{2 \times m \times a} \quad (35)$$

Но это еще не все. Полученная равносекционная обмотка с числом витков на фазу W''ф должна полностью использовать магнитную систему двигателя по магнитной нагрузке на всех участках цепи. В первую очередь, должны строго входить в нормы величины Bz и Bс, приведенные в таблице 10. 1., так как электротехническая сталь, как известно, обладает насыщением. Поэтому расчетное повышение магнитных нагрузок (Bz, Bс) сверх рекомендованных приведет к их фактическому значительному увеличению. Резко возрастет лишь ток холостого хода (рис. 30), причем он может оказаться значительно больше номинального. Следовательно, завышение величин B и Iхх повысит только нагрев стали сердечника (Pхх = B^2) и вызовет перегрев обмотки (Pкз = I^2). Занижение величин B (а значит и магнитного потока Ф) уменьшит мощность машины.

Проверка равносекционной обмотки по нагрузкам.

Магнитные индукции зависят от величины магнитного потока Ф, который при округлении до W''ф изменится и будет равен, *Вб*:

$$Ф'' = \frac{0{,}97 \times Uф}{4{,}44 \times f \times Коб \times W''ф} \quad (36)$$

Так как поток Ф" в магнитной системе электромашины на всех участках неизменный (Ф = const), то значения $B\delta$, Bz, Bc зависят площадей участков магнитной цепи: в воздушном зазоре – $Q\delta$, зубцовой зоне – Qz, в спинке статора – Qc.

Следовательно, плотности магнитного потока (магнитные индукции) на указанных участках будут неодинаковыми и равными, *Тл*:

$$B\delta = \frac{Ф''}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta} \quad (37)$$

$$Bz = \frac{Ф''}{\frac{2}{\pi} \times Qz} = B\delta \times \frac{Q\delta}{Qz} \quad (38)$$

$$Bc = \frac{Ф''}{2 \times Qc} = B\delta \times \frac{2}{\pi} \times \frac{Q\delta}{2 \times Qc} \quad (39)$$

В зубцовой зоне магнитопровода АД распределение магнитной индукции Bz практически остается таким же, как в воздушном зазоре, поэтому коэффициент $2/\pi$ в выражении (38) сохраняется, как и при определении $B\delta$.

В формуле расчета Bc (39) учитывается, что магнитный поток в спинке статора распределяется по всей площади равномерно (отсюда коэффициента $2/\pi$ – нет), а также то, что в спинке поток разделяется на две части (рис. 48), поэтому в знаменателе – двойка. Магнитные нагрузки Bz и Bc сравниваются с допустимыми. Они должны быть в пределах величин, указанных в табл. 10. 1, т. е. оптимальными.

Если магнитная нагрузка на каком–либо участке магнитной цепи (в электротехнической стали) выше нормы, необходимо повторить расчет, начиная с формулы $W''ф$ (35), увеличив число проводников в пазу $Nп$, если ниже – необходимо уменьшить число проводников в пазу. Тем самым соответственно уменьшается или увеличивается магнитный поток.

Однако, даже если на всех участках магнитной цепи индукции вошли в пределы установленных норм, это не значит, что расчет может быть окончен. Рассчитываемый двигатель должен иметь оптимальные параметры, т. е. из его магнитопровода должна быть "выжата" максимально возможная мощность. Естественно, при этом $B\delta$, Bz, Bc должны иметь наибольшие значения из приведенных в табл. 10. 1. норм. Для выполнения поставленной цели, меняя выполняют несколько вариантов расчетов магнитных нагрузок.

Для наглядности проводимого подбора рационального числа витков в обмотке одной фазы асинхронного двигателя результат, всех расчетов обычно сводятся в таблицу (табл. 10. 2).

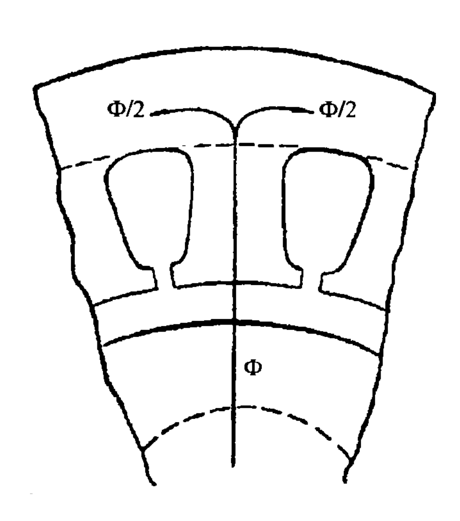


Рис. 48. Распределение магнитного потока в спинке статора.

Таблица 10. 2. Нагрузка магнитной цепи при числе витков W''ф.

Величина	Расчетная формула	Варианты расчета			Допустимые пределы
		1	2	3	
Проводники в пазу Nп	$N\text{п} = \frac{2 \times W\text{ф} \times m \times a}{Z}$				
Витки в обмотке одной фазы W''ф	$W''\text{ф} = \frac{N\text{п} \times Z}{2 \times m \times a}$				
Магнитный поток при W''ф, $Вб$	$\Phi = \frac{0{,}97 \times U\text{ф}}{4{,}44 \times f \times K\text{об} \times W''\text{ф}}$				
Индукция в воздушном зазоре $B\delta$, $Тл$.	$B\delta = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta}$				Табл. 10. 1
Индукция в зубцовой зоне Bz, $Тл$.	$Bz = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Qz}$				Табл. 10. 1
Индукция в спинке статора Bc , $Тл$.	$Bc = \frac{\Phi}{2 \times Qc}$				Табл. 10. 1

Вместе с изложенным следует учитывать, что при пересчете АД на другую частоту вращения нарушается согласование площадей участков магнитной цепи ($Q\delta$, Qz, Qc). Отсюда магнитная индукция одного из участков в стали (Bz или Bc) может оказаться меньше нормы, тогда как другая – в норме. Однако, если увеличить магнитную индукцию в первом участке, во втором она поднимется сверх нормы. Такое превышение вызывает перегрев стали, ускоренное старение изоляции и выход машины из строя (она просто "сгорит"). Поэтому, несмотря на то, что один из участков магнитной цепи недогружен, а следовательно, будет иметь место некоторое занижение мощности асинхронного двигателя, рациональным числом витков принимается то, при котором ни Bz ни Bc не выходят за пределы норм.

Кроме того, при изменении *частоты вращения* у асинхронного двигателя после ремонта может иметь место: "*залипание*" – ротор не проворачивается при включении машины в сеть, "*застревание*" – ротор вращается на значительно пониженных оборотах ("повышенный шум").

Причины кроются в содержании высших гармонических составляющих в магнитном потоке электромашины, а это связано с нарушением соотношения между числами зубцов магнитопровода статора (Z_1) и ротора (Z_2). Вот почему при такой модернизации асинхронного двигателя обязательно проводится проверка на допустимость ее проведения:

для предупреждения "прилипания" ротора в момент пуска требуется:

$$Z_2 \neq Z_1, \qquad Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1, \qquad Z_2 \neq 2 \times Z_1 \quad (40)$$

кроме того:

$$Z_2 \neq (2p \times 3) \times i \quad (41)$$

где: i – любое целое число, p – число пар полюсов.

Для предупреждения "застревания" ротора на пониженной частоте вращения необходимо:

$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i + 2p = 2p \times (3 \times i + 1) \quad (42)$$

кроме того:

$$Z_2 \neq Z_1 \pm p, \qquad Z_2 \neq Z_1 \pm 2p$$
$$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p, \quad Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p \quad (43)$$

Для предупреждения "*повышенного шума*" электродвигателя требуется:

$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i \pm 1$$
$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i \pm (2p \pm 1) \quad (44)$$

Упрощенное определение числа проводников в одном пазу Nп.

Целью расчета является сокращение вычислений подбора рационального числа витков Wф. Для этого в выражение Nп (34) подставляется значение Wф (31) и получается:

$$N\text{п} = \frac{2 \times m \times a \times 0{,}97 \times U\text{ф}}{4{,}44 \times f \times \Phi \times K\text{об} \times Z} \quad (45)$$

Если f = 50 *гц*, коэффициент Kоб ≈ 0,97, то с допустимыми округлениями формула (45) принимает вид:

$$N\text{п} = \frac{a \times U\text{ф}}{37 \times \Phi \times Z} \quad (46)$$

В полученном выражении неизвестен только магнитный поток Ф. Его можно определить по известным допустимым величинам магнитной индукции (табл. 10. 1) или в зубцовой зоне Bz по формуле (38), или в спинке статора Bс по формуле (39), так как на всех участках магнитной цепи неизменен, тогда, *Вб*:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times Bz \times Qz \quad (47)$$

или

$$\Phi = B\text{с} \times 2 \times Qc \quad (48)$$

где: 2/π – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока в зубцовой зоне сердечника статор 2 – коэффициент в формуле (48) учитывает разделение магнитного потока Ф в спинке статора на два направления.
Следует учитывать, что если магнитопровод рассчитываемой электромашины выполнен для числа полюсов, не соответствующих запроектированной частоте вращения (т. е. nн – изменено) между площадями магнитной цепи (Qδ, Qс и Qz), как уже говорилось, нарушается согласование. В этом случае формула расчет магнитного потока Ф зависит от соотношения площадей Qz и Qс. Причем при:

$$\frac{2 \times Q\text{с}}{Qz} \geq 1{,}15 \quad (49)$$

(nз < nн, где nз заданная заказчиком частота вращения поля) Ф следует определять только по магнитной индукции в зубцовой зоне Bz (47), если менее 0,75 (nз < nн), то рассчитывать ее можно только по магнитной индукции в спинке статора Bс (48).
Полученную из формулы (45) или (46) величину числа активных проводников в пазу Nп подставляют в выражение (35) и находят число витков в обмотке одной фазы W''ф. При этом в случае сомнения можно вновь определить уточненный магнитный поток – Ф (36) и индукции: в зубцовой зоне – Bz (38), в спинке статора – Bс (39), и сравнить результаты с допустимыми величинами в таблице 10. 1, при необходимости проводится коррекция.

Число витков в секции обмотки.

В однослойной обмотке активные проводники одной секции ($W_C^{(1)}$) полностью занимают паз, поэтому число витков в секции равно числу этих проводников в пазу:

$$W_{1C}^{(1)} = N\text{п} \quad (50)$$

В двухслойной обмотке в одном пазу лежат активные проводники двух секций, следовательно, число витков в секции ($W_C^{(2)}$) равно половине числа активных проводников в пазу:

$$W_{1C}^{(2)} = \frac{N\text{п}}{2} \quad (51)$$

Пример. Определить рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя с параметрами, фазное напряжение Uф = 220 *в*; частота вращения поля в расточке статора n = 1500 *мин*$^{-1}$; частота тока, f = 50 *гц*; число пазов в магнитопроводе Z = 48; внутренний диаметр расточки магнитопровода статора D = 197 *мм*.; площадь полюса в воздушном зазоре Qδ = 0,0224 *м*^{2}; в зубцовой зоне Qz = 0,0013 *м*^{2}; площадь спинки магнитопровода статора Qс = 0,0051 *м*^{2}; полный (диаметральный) шаг обмотки y = 12; число пазов на полюс и фазу q = 4; число электрических градусов α = 15 (эл. гр.); число параллельных ветвей обмотки примем равным единице.
Решение. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя Wф.
1. Для упрощения определяем дополнительные исходные данные:
1. 1. Количество пар полюсов (4):

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$$

1. 2. Приблизительную полную мощность асинхронного двигателя – $P_{\text{ДВ}}$ – находим по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора (см. график выше стр. 23). При D = 197 *мм*. и числе пар полюсов p = 2, $P_{\text{ДВ}}$ ≈ 17 – 18 *кВА*.
1. 3. Укороченный шаг обмотки с округлением:

$$y = 0{,}8 \times y' = 0{,}8 \times 12 = 10 \text{ зубцов}$$

2. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя (Pн) меньше полной на величины cosφ и КПД (η) Учитывая это рекомендованную магнитную индукцию в воздушном зазоре по таблице 10. 1. берем в интервале мощностей от 10–100 *кВт* (Bδ = 0,7 – 0,9 *Тл*). По данным осмотра и документов электромашина отработала более половины своего ресурса, отсюда принимаем Bδ = 0,75 *Тл*.
3. Величина магнитного потока (33):

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta = \frac{2}{3{,}14} \times 0{,}75 \times 0{,}0224 = 0{,}011 \text{ Вб}$$

4. Предварительное число витков в обмотке одной фазы (31):

$$W\text{ф} = \frac{0{,}97 \times U\text{ф}}{4{,}44 \times f \times \Phi \times K\text{об}} = \frac{0{,}97 \times 220}{4{,}44 \times 50 \times 0{,}011 \times 0{,}925} = 94{,}48$$

где Kоб – обмоточный коэффициент, находим:

по коэффициенту распределения обмотки (27):

$$K\text{р} = \frac{\sin\left(\alpha \times \frac{q}{2}\right)}{q \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(15 \times \frac{4}{2}\right)}{4 \times \sin\left(\frac{15}{2}\right)} = 0{,}958$$

по коэффициенту укорочения (28):

$$K\text{у} = sin \times \left(90 \times \frac{y}{y'}\right) = sin \times \left(90 \times \frac{10}{12}\right) = 0{,}966$$

следовательно, коэффициент обмотки Kоб (29):

$$K\text{об} = K\text{р} \times K\text{у} = 0{,}958 \times 0{,}966 = 0{,}925$$

Число витков в обмотке W''ф не может быть дробным, так как 0,48 витка положить в паз невозможно, отсюда (после округления) W'ф = 94 витка.

5. Для выполнения условия равносекционности определяем число активных проводников в одном пазу (34):

$$N\text{п} = \frac{2 \times W\text{ф} \times m \times a}{Z} = \frac{2 \times 94 \times 3 \times 1}{48} = 11{,}75$$

После округления для двухслойной обмотки Nп = 12.

6. Следовательно, предварительное число витков в обмотке одной фазы будет равно (35):

$$W''\text{ф} = \frac{N\text{п} \times Z}{2 \times m \times a} = \frac{12 \times 48}{2 \times 3 \times 1} = 96$$

где W''ф – целое и четное число, а значит округлений, изменений не требует.

7. Проверяем нагрузку магнитной цепи сердечника статора АД при W''ф = 96 витков.

7. 1. Магнитный поток (36):

$$\Phi = \frac{0{,}97 \times U\text{ф}}{4{,}44 \times f \times K\text{об} \times W''\text{ф}} = \frac{0{,}97 \times 220}{4{,}44 \times 50 \times 0{,}925 \times 96} = 0{,}0108 \text{ Вб}$$

7. 2. Магнитные индукции (с округлениями).

в воздушном зазоре из формулы (37):

$$B\delta = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta} = \frac{0{,}0108}{\frac{2}{3{,}14} \times 0{,}0224} = 0{,}727 \text{ Тл}$$

в зубцовой зоне (38):

$$Bz = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Qz} = \frac{0{,}0108}{\frac{2}{3{,}14} \times 0{,}013} = 1{,}3 \text{ Тл}$$

в спинке статора (39):

$$Bc = \frac{\Phi}{2 \times Qc} = \frac{0{,}0108}{2 \times 0{,}0051} = 1{,}06 \text{ Тл}$$

Из табл. 10. 1 видно, что магнитные нагрузки Bс и Bz меньше допустимых, это позволяет увеличить магнитный поток Ф (без перегрева стали) путем уменьшения числа витков в обмотке. А это, в свою очередь, позволяет увеличить сечение провода в пазу, номинальный ток и мощность АД.

Изменение Nп меняет Wф, поэтому в формуле (35) принимаем Nп = 10 (вместо Nп = 12), тогда:

$$W''ф = \frac{Nп \times Z}{2 \times m \times a} = \frac{10 \times 48}{2 \times 3 \times 1} = 80 \text{ витков}$$

Далее расчет выполняется в том же порядке, что и ранее: по формулам (36), (38), (39) рассчитываются Ф, Bс и Bz с проверкой последних по допустимым величинам табл. 10. 1. Для удобства все расчеты сводим в табл. 10. 3.

Анализ расчетов показывает, что при числе витков в обмотке одной фазы, равном 80, нагрузки в магнитной цепи сердечника АД наиболее удовлетворяют установленным нормам (табл. 10. 1). Повышение или понижение W''ф значительно ухудшает загрузку магнитопровода. Отсюда для изготовления двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя принимаем число витков Wф = 80.

Таблица 10. 3. Нагрузка магнитной цепи при числе витков Wф.

Величина	Расчетная формула	Варианты расчета			Допустимые пределы
		1	2	3	
Проводники в пазу Nп	$Nп = \frac{2 \times W''ф \times m \times a}{Z}$	12	10	8	–
Витки в обмотке одной фазы W''ф	$W''ф = \frac{Nп \times Z}{2 \times m \times a}$	96	80	64	–
Магнитный поток при W''ф, *Вб*	$Ф = \frac{0,97 \times Uф}{4,44 \times f \times Kоб \times W''ф}$	0,0108	0,0130	0,016	–
Индукция в воздушном зазоре $B\delta$, *Тл.*	$B\delta = \frac{Ф}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta}$	0,757	0,91	1,12	0,7–0,9
Индукция в зубцовой зоне Bz, *Тл.*	$Bz = \frac{Ф}{\frac{2}{\pi} \times Qz}$	1,3	1,57	1,93	1,4–1,8
Индукция в спинке статора Bс , *Тл.*	$Bc = \frac{Ф}{2 \times Qc}$	1,06	1,27	1,57	1,3–1,6

Рассчитаем число витков в одной секции двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя $W_{1C}^{(2)}$. Так как при числе витков в обмотке одной фазы, равной 80, число проводников в одном пазу – 10 (Nп = 10), тогда для двухслойной обмотки число витков в одной секции будет (51):

$$W_{1C}^{(2)} = \frac{Nп}{2} = \frac{10}{2} = 5$$

Пример. Определим упрощенным методом рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя. Данные магнитопровода: внутренний диаметр расточки статора D = 105 *мм.*; площадь полюса в зубцовой зоне Qz = 0,0032 $м^2$; площадь спинки статора Qс = 0,0019 $м^2$; число пазов Z = 36. Технические задания заказчика: фазное напряжение Uф = 220 *в*; частота вращения поля в расточке статора 1000 $мин^{-1}$; частота тока f = 50 *гц*. Число параллельных ветвей обмотки примем равным 1.

Решение. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя Wф:
1. Количество пар полюсов из выражения (4) будет:

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3$$

2. Находим приблизительную полную мощность асинхронного двигателя $P_{\text{ДВ}}$ по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора (см. стр. 23) при D = 105 *мм*. и числе пар полюсов p = 3, $P_{\text{ДВ}} \approx 1$ *кВА*. С учетом cosφ и КПД (η). Мощность АД P – менее 1 *кВт*.
3. Определяем соотношение площадей в спинке статора и зубцовой зоне магнитопровода (49):

$$\frac{2 \times Q\text{с}}{Qz} = \frac{2 \times 0{,}0019}{0{,}0032} = 1{,}18$$

4. Расчет магнитного потока выполняем по формуле (47), так как 1,18 > 1,15, т. е. nз < nн. Для этого по данным табл. 10. 1. (в интервале Pн до 1 *кВт*) берем Bz равной 1,4 *Тл*:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times Bz \times Qz = 0{,}637 \times 1{,}4 \times 0{,}0032 = 0{,}0029 \text{ Вб}$$

5. Число активных проводников в одном пазу (46):

$$N\text{п} = \frac{a \times U\text{ф}}{37 \times \Phi \times Z} = \frac{1 \times 220}{37 \times 0{,}0029 \times 36} = 56{,}95$$

Округляем полученную величину до целого и четного значения Nп = 58 проводников.
6. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя Wф (35):

$$W''\text{ф} = \frac{N\text{п} \times Z}{2 \times m \times \alpha} = \frac{58 \times 36}{2 \times 3 \times 1} = 348 \text{ витков}$$

Проверим число витков.
магнитный поток (36):

$$\Phi = \frac{U\text{ф}}{4{,}44 \times f \times W''\text{ф}} = \frac{220}{4{,}44 \times 50 \times 348} = 0{,}00285 \text{ Вб}$$

где 0,97 в числителе и Kоб в знаменателе сокращены (близкие по значению);
магнитная индукция в зубцовой зоне (38):

$$Bz = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Qz} = \frac{0{,}00285}{\frac{2}{3{,}14} \times 0{,}0032} = 1{,}398 \text{ Тл}$$

магнитная индукция в спинке статора (39):

$$Bc = \frac{\Phi}{2 \times Qc} = \frac{0{,}00285}{2 \times 0{,}0019} = 0{,}75 \text{ Тл}$$

Величина магнитной индукции Bс значительно ниже допустимой – что объясняется нарушением согласования площадей магнитной цепи, так как заданная заказчиком частота вращения поля в расточке статора (nз = 1000 $мин^{-1}$) не соответствует той, на которую начально был номинально рассчитан магнитопровод электромашины.
Это позволяет, несмотря на остаточный ресурс машины, увеличить индукцию Bz до максимального значения (1,5 *Тл*) путем уменьшения числа витков в обмотке одной фазы, т. е. принять Nп = 54.

Действительно, в этом случае W''ф равно 324 виткам, Ф = 0,003 *Вб*, Bz = 1,5 *Тл*, Bc = 0,79 *Тл*.

Нарушение согласования площадей в магнитной цепи электрической машины не только понижает ее мощность, но резко ухудшает эксплуатационные показатели работы двигателя, ведет к перерасходу электрической энергии в сети.

Поэтому ремонт АД с изменением номинальной частоты вращения должен быть обязательно технико–экономически обоснован. Также обязательно требуется проверка согласования числа зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 по формулам (40) – (44).

Рассчитаем число витков в одной секции двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя $W_{1C}^{(2)}$. Расчет выполним по выражению (51):

$$W_{1C}^{(2)} = \frac{N\text{п}}{2} = \frac{54}{2} = 27 \text{ витков}$$

10. 6. Выбор изоляции паза и лобовых частей обмотки.

Цель изоляции асинхронного двигателя – обеспечение при соответствующей нагревостойкости требуемой электрической прочности между обмотками разных фаз и магнитопроводом, а также между собой. Кроме того, она должна быть химически стойкой, влаго–водостойкой, механически прочной и пр. Изоляция паза (рис. 49) состоит из пазовой коробки (гильзы) 1, межслойной прокладки 2 (если обмотка двухслойная), прокладки под клин 3 и пазового клина 4. Межфазовые прокладки устанавливаются в лобовых частях секций или катушечных групп, изолируются внутримашинные соединения, а также металлические бандажи в пазовых и лобовых частях обмотки.

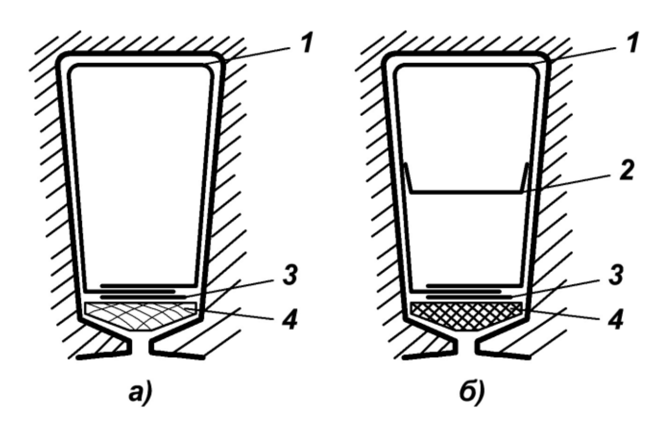


Рис. 49. Изоляция паза двухслойной (а) и однослойной (б) обмоток.

При ремонте асинхронных двигателей серий А, АО, А2, АО2, 4А с нагревостойкостью изоляции А и F наиболее распространены пазовые коробки (гильзы) из 3–х слоев диэлектриков:
первый слой (кладется в пазе на магнитопровод), его назначение – защита второго слоя от повреждения листами стали; от этих материалов требуется высокая механическая прочность (электрокартон и др. изделия).
второй слой – основная электрическая изоляция; от нее требуется высокая электрическая прочность (гибкие пленки, лакоткани и тому подобные материалы).
третий слой делается из механически прочного диэлектрика.
Он так же, как и первый, защищает второй слой от повреждений, но уже от активных проводников, которые помещаются в паз (электрокартон, кабельная бумага и т.п.).

Пазовый короб должен плотно прилегать к стенкам паза, не сминаться при укладке обмотки, быть стойким к надрыву, продавливанию, расслоению и быть достаточно скользким. Изоляция под бандаж выполняется так же, как и коробка, в три слоя, а междуфазные прокладки в лобовых частях обмотки могут иметь один, два или три слоя в зависимости от используемых материалов.

Электроизоляционные материалы всех указанных деталей обмоток выбираются в зависимости от класса нагревостойкости, номинального напряжения и мощности, условий работы АД, наличия диэлектрических материалов и по экономическим соображениям.

В современных электрических машинах с напряжением до 1000 *в* широко применяются синтетические пленки и материалы, изготовленные с помощью композиционных материалов (пленкоэлектрокартон). Они позволяют значительно сократить толщину изоляции вследствие их высокой электрической, а нередко и механической прочности, что повышает коэффициент заполнения паза.

Полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка ПЭТФ и пленкоэлектрокартон применяются в первую очередь для изготовления пазовых коробок и прокладок. При этом две полоски пленкоэлектрокартона складываются пленкой внутрь.

Полиамидная пленка ПМ используется в электрических машинах с нагревостойкостью изоляции до 220 °С.

Фторопластовая пленка Ф–4ЭО, Ф–4ЭН имеет высокую влагостойкость, стойкость к растворителям, воздействию химически активных сред, применяется в машинах специального назначения (например, для работы во фреоновых компрессорах) и в тех случаях, когда нагревостойкость изоляции должна быть выше 220°С. Однако фторопластовые пленки мягки, поэтому для пазовой изоляции их применяют в сочетании с другими, более жесткими материалами.

Композиционные материалы обладают достаточно высокими механическими свойствами, они поставляются в рулонах.

Пленкосинтокартоны марок ПЭТ–Ф, ПСК–ЛП состоят из пленки ПЭТФ, оклеенной с двух сторон либо бумагой из фенилового волокна (ПСК–Ф), либо бумагой из лавсанового волокна без пропитки (ПСК–Л) или с пропиткой (ПСК–ЛП).

Пленкослюдопласт ГИП–ЛСП–ПЛ представляет собой слой флогопитового слюдопласта, оклеенного с одной стороны стеклотканью, а с другой – пленкой ПЭТФ, широко используется для изоляции обмоток из жестких секций.

Для прокладок в лобовых частях применяются материалы, поверхность которых имеет повышенный коэффициент трения, в частности, кабельную бумагу, тонкий электрокартон, пленколакослюдопласт, пленкоасбестокартон (их используют в двигателях серий А, А2, 4А).

Внутримашинные соединения и выходные концы изолируются электроизоляционными трубками в местах, где они не подвергаются изгибам, кручению и сжатию. При увязке схемы применяют лакированные трубки марок: ТЛВ и ТЛС (на основе стеклянного чулка и масляного лака) – у машин с классом нагревостойкости изоляции А для работы в нормальных условиях окружающей среды; ТЭС –– для машин с классом нагревостойкости В всех исполнений; ТКС – для машин с классом нагревостойкости F и Н химически стойкого исполнения.

Трубки на основе фторорганической резины марки ТРФ наиболее эластичны и стойки к перегибам. Для механической защиты и закрепления изоляции применяют хлопчатобумажные, стеклянные и лавсановые ленты.

Причем хлопчатобумажные ленты используются только в машинах с классом нагревостойкости изоляции А и только в пропитанном виде. Стеклянные ленты пригодны для машин классов нагревостойкости изоляции Е, В, F и Н всех исполнений. Для уменьшения выделений из стеклянной ленты пыли при изолировании их пропитывают лаками.

Лавсановые ленты разработаны в последние годы и внедряются в производство. Они могут заменить не только стеклоленты, но и шнуры. Их можно использовать для обмоток с классом нагревостойкости изоляции Н. Лавсановые ленты не требуют пропитки. Толщина их, *мм*: миткалевой – 0,14, батистовой – 0,15, тафтяной – 0,16. Наиболее часто применяется для обмоток тафтяная лавсановая лента, она выпускается шириной 20, 25, 30 *мм*. При ширине 20 *мм*. разрывная нагрузка такой ленты составляет 390 Н. Большое преимущество лавсановых лент – их усадка после термообработки, в результате чего происходит дополнительная натяжка изоляции. Для увязки и бандажировки обмоток статора в лобовых частях применяют хлопчатобумажные шнур–чулки при классе нагревостойкости изоляции А и стеклянные шнур–чулки при классах нагревостойкости В, F Н. В заключение выбора материалов (диэлектриков) для пазовой коробки целесообразно проверить полученную изоляцию по величине их суммарной электрической прочности, *кв* (киловольт):

$$\Sigma E\text{пр} = E1\text{сл} + \cdots + En\text{сл} \quad (52)$$

$E1$сл – электрическая прочность диэлектрика 1–го слоя, *кв*; Enсл – электрическая прочность n –го слоя, *кв*. Суммарная электрическая прочность ΣEпр должна быть обязательно больше испытательного напряжения Uис электромашины:

$$\Sigma E\text{пр} > U\text{ис} \quad (53)$$

Для справки – Uис низковольтных асинхронных машин мощностью до 1000 *квт* и номинальным напряжением свыше 100 *в* в соответствии с ГОСТ 183–74 равняется 1000 + 2×Uис, но не менее 1500 *в*.
Пример. Для пазовой гильзы асинхронного двигателя с номинальным напряжением 380/220 В и изоляцией класса А, состоящей из трех слоев, выбраны: 1–й слой – электрокартон ЭВС, толщиной δ = 0,3 *мм*., Eпр – 12 *кв/мм*., 2–й слой – лакоткань ЛХМ–105, δ = 0,17 *мм*., Eпр – 6 *кв* (пробивное напряжение дано для данной толщины диэлектрика), 3–й слой – электрокартон ЭВС, δ = 0,2 *мм*., Eпр – 12 *кв/мм*.
Проверить выбранные диэлектрики на электрическую прочность изоляции паза: 1–го слоя Eпр × δ = 12 × 0,3 = 3,6 *кв*; 2–го слоя Eпр = 6 *кв*; 3–го слоя Eпр × δ = 12 × 0,2 = 2,4 *кв*.
Суммарная электрическая прочность пазовой изоляционной коробки (52):

$$\Sigma E\text{пр} = E1\text{сл} + \cdots + En\text{сл} = 3{,}6 + 6 + 2{,}4 = 12\ \text{кв} \quad (52)$$

Проверка электрической прочности гильзы (53):

$$\Sigma E\text{пр} > U\text{ис} = 1000 + 2U\text{н}, \text{так как } 12 > 1{,}0 + 2 \times 0{,}38\ \text{кв}$$

Изоляция удовлетворяет поставленным условиям (12 > 1,76), более того, диэлектрики можно взять меньшей толщины. Однако, учитывая необходимость обеспечения нужной механической прочности изоляции, выбранные материалы можно утвердить.

10.7. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода.

Марка провода выбирается по тем же параметрам, что и изоляции паза: в зависимости от класса нагревостойкости, номинального напряжения и мощности, условий работы АД, наличия требуемых материалов и по экономическим соображениям.
После выбора марки выполняется расчет параметров обмоточного провода. Расчетное сечение провода с изоляцией определяется по формуле, *мм*^{2}:

$$П'_P = \frac{Q_П \times K'_З}{N_П} \quad (54)$$

где $K'_З$ – коэффициент заполнение паза, учитывающий, что часть пространства в пазу занято изоляционной гильзой, межслоевой прокладкой (при двухслойной обмотке), прокладкой под клин, клином, прокладкой под гильзу, а также учитывающий не плотность укладки активных проводников в пазу. Отсюда, $Q_П \times K_З$ – это активная площадь паза, т. е. та площадь, которая занята в пазу непосредственно изолированными активными проводниками обмотки. Естественно, что ее стремятся получить как можно больше. Вместе с тем при выборе коэффициента К, следует помнить: если взять его больше, чем допускает изоляция паза, возникают трудности с укладкой секций в пазы; если меньше – это потребует занижения сечения провода, и, в конечном итоге, снизит мощность двигателя. Рекомендуемые средние значения коэффициентов заполнения паза с конструкциями пазовой изоляции, описанными выше, даны в табл. 10. 4.

Таблица 10. 4. Коэффициенты заполнения паза.

Обмотка	$K_З$ при мощности двигателя, *кВт*		
	до 1	1–10	10–100
однослойная	0,40–0,44	0,44–0,48	0,518–0,52
двухслойная	0,35–0,39	0,38–0,42	0,48–0,52

Меньшие значения берутся при меньшей мощности АД и пазовой изоляции на основе толстых диэлектриков, большие – при большей мощности машины и изоляции с использованием тонких диэлектриков. При круглом сечении провода, исходя из известного выражения площади окружности, определяется диаметр провода с изоляцией, *мм*^{2}:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \times П'_Р}{\pi}}$$

По расчетным $П'_Р$ и d' в таблицах ГОСТ или справочников выбирается обмоточный провод стандартного сечения без изоляции ($П_{РГОСТ}$), его диаметры: с изоляцией ($d'_{ГОСТ}$) и без – ($d_{ГОСТ}$). При этом следует не забывать, что $d'_{ГОСТ}$ определяется толщиной изоляции на проводе, а она зависит от марки и сечения; а также того, что диаметр изолированного провода должен быть на 1,5–2,0 *мм*. меньше ширины шлица паза ($b_Ш$).
В тех случаях, когда диаметр изолированного провода не отвечает поставленному условию, необходимо разделить расчетное сечение $П_Р$ на два, три или даже четыре провода с одинаковыми площадями (так называемые *параллельные сечения*). Расчетный диаметр провода с изоляцией и с учетом параллельных сечений, *мм*^{2}:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \times П'_Р}{\pi \times a'}}$$

где a'– число параллельных сечений (в общем случае оно не должно быть больше 4).
Вновь по d' выбирается в таблицах ГОСТ или справочников стандартный провод для выбранной марки со всеми его показателями: $П_{РГОСТ}$, $d_{ГОСТ}$ и $d'_{ГОСТ}$, где $П_{РГОСТ}$ – сечение без изоляции.

Если число параллельных сечений уже равно четырем (a' = 4), а диаметр провода не отвечает ширине шлица паза, уменьшенного на 1,5–2,0 *мм*., т. е. $d' > b_Ш – (1,5 – 2)$, по возможности увеличивается число параллельных ветвей (a).

Для этого, начиная с формулы (34), делается повторный расчет. Однако, если и в этом случае d' не отвечает ширине шлица паза, a' допускается увеличить до 6.

Пример:

$$\text{ПЭВ} - 2 \qquad 1{,}77 \times 2 \times \frac{1{,}50}{1{,}61}$$

ПЭВ – 2 — марка провода
1,77 — сечение провода без изоляции
1,50 — диаметр провода без изоляции
1,61 — диаметр провода с изоляцией
2 — число параллельных проводников (сечений)

Пример. Выбрать марку обмоточного провода для асинхронного двигателя, работающего в условиях ремонтного цеха, с параметрами: номинальное напряжение – 380/220 *в*; частота тока – 50 *гц*; диаметр расточки статора – D = 197 *мм*.; частота вращения поля n = 1500 $мин^{-1}$; сечение паза в свету – $Q_{\text{П}}$ = 132,2 $мм^2$; ширина шлица паза – $b_{\text{Ш}}$ = 3,5 *мм*.; число активных проводников в пазу – $N_{\text{П}}$ = 14 *шт*.; обмотка двухслойная. Рассчитать и подобрать по таблицам ГОСТ сечение и диаметр провода.
Решение. Для упрощения выбора марки провода и его расчета определяем дополнительные исходные данные: количество пар полюсов (4):

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2 \text{ шт}$$

Приблизительную полную мощность асинхронного двигателя $S_{\text{ДВ}}$ находим по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{\text{ДВ}} = f(D)$ (см. таблицу на стр.). При D = 197 *мм*. и числе пар полюсов p = 2 шт., $S_{\text{ДВ}} \approx 17 - 18$ *кВА*.

1. Примем во внимание, что нагревостойкость АД по условиям работы в сухом не запыленном помещении целесообразно отнести к классу *В*. Номинальная мощность его находится в пределах 10–100 *кВт*. Номинальное напряжение равно 380/220 *в*. С учетом стоимости обмоточных проводов наиболее подходящей является марка провода ПЭТВ–2.
2. Расчетное сечение провода с изоляцией находим по выражению (54):

$$\Pi'_P = \frac{Q_{\text{П}} \times K'_3}{N_{\text{П}}} = \frac{132 \times 0{,}5}{14} = \ 4{,}72 \text{ мм}^2$$

где $K'_З$ –коэффициент заполнения паза (принят по табл. 10. 4 равным 0,5, так как для изготовления пазовой коробки и внутрипазовых прокладок использованы: пленкосинтокартон ПСК–Ф, стеклотекстолит СТЭФ–1 и тому подобные материалы, обладающие высокой электрической и механической прочностью при малой толщине).
3. Определяем диаметр провода с изоляцией:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \times \Pi'_{\text{Р}}}{\pi \times a'}} = \sqrt{\frac{4 \times 4{,}72}{3{,}14 \times 1}} = 2{,}45 \text{ мм}$$

4. По полученным данным: $\Pi_{\text{Р}}$ = 4,72 $мм^2$ и d = 2,45 *мм*., выбираем в таблице стандартных проводов (см. приложение 10) для марки ПЭТВ–2 провод диаметром с изоляцией $d'_{\text{ГОСТ}}$ = 2,48 *мм*. Его диаметр без изоляции $d_{\text{ГОСТ}}$ равен 2,36 *мм*., сечение $\Pi_{\text{РГОСТ}}$ = 4,37 $мм^2$.
5. Проверяем возможность прохода провода через шлиц паза. Для этого необходимо выполнение условия $d'_{\text{ГОСТ}} < b_{\text{Ш}} - (1{,}5 - 2)$. Но даже если взять меньший предел $b_{\text{Ш}} - 1{,}5$ = 3,5 – 1,5 = 2 *мм*., оно не выполняется, так как 2,48 *мм.* > 2 *мм*. Следовательно, при укладке обмоточного провода в паз возможно повреждение изоляции.

Учитывая это, принимаем не одно, а два параллельных сечения (a' = 2), тогда (54):

$$d' = \sqrt{\frac{4 \times П'_Р}{\pi \times a'}} = \sqrt{\frac{4 \times 4{,}72}{3{,}14 \times 2}} = 1{,}73 \text{ мм}$$

5. 1. По новому d' = 1,73 *мм*. выбираем в таблице стандартный провод диаметром с изоляцией $d'_{ГОСТ}$ = 1,71 *мм*. Диаметр без изоляции $d_{ГОСТ}$ = 1,6 *мм*., сечение $П_{РГОСТ}$ = 2,01 $мм^2$.

6. Принимаем для изготовления секций два одинаковых по сечению провода $П_{РГОСТ}$ = 2,01 $мм^2$ марки ПЭТВ–2 с диаметрами без изоляции – $d_{ГОСТ}$ = 1,6 *мм*., с изоляцией $d'_{ГОСТ}$ = 1,71 *мм*.:

$$\text{ПЭТВ-2} \quad 2 \times 2{,}01 \times \frac{1{,}6}{1{,}71}$$

10. 8. Расчет размеров секции (длины витка).

Определение длины витка необходимо для наладки шаблона при изготовлении секций катушечных групп, а также для последующих расчетов: массы обмоточного провода для выполнения обмотки, определения сопротивления обмотки постоянному току и пр. Виток состоит из 2–х активных и 2–х лобовых частей (рис. 37), следовательно, длина витка, *м*:

$$l_В = 2 \times (l\text{а} + l_Л) \quad (56)$$

где: lа – пазовая (активная) длина витка, *м*; lл – длина лобовой части витка, *м*. При отсутствии поперечных каналов охлаждения в магнитопроводе lа = lл; длина лобовой части витка обмотки определяется по следующей формуле, *м*:

$$l_Л = k \times T + l' \quad (57)$$

где: k – поправочный коэффициент; T – средняя ширина секции, *м*; l' – коэффициент запаса, *м*. Коэффициенты поправочный и запаса зависят от метода изготовления обмотки и количества полюсов асинхронного двигателя (табл. 10. 5).

Таблица 10. 5. Коэффициенты поправочные и запаса.

$2p$	Сердечник статора, намотанный			
	отдельно		непосредственно в корпусе	
	k	l', *м*.	k	l', *м*.
2	1,25	0,02	1,30	0,03
4	1,30	0,02	1,35	0,03
6	1,40	0,02	1,50	0,03
8	1,50	0,02	1,55	0,03

Приведенные в табл. 10.5 величины k и l' используются при расчете длины лобовой части 2–х слойных обмоток с укороченным шагом; для однослойных петлевых обмоток k и l' берутся на 10– 15% больше, чем для двухслойных обмоток, а для однослойных концентрических – больше на 20–23%.

Средняя ширина секции (под ней понимается длина дуги окружности, центр которой лежит на оси вращения ротора машины, ограниченная активными сторонами одной и той же секции) определяется так, *м*:

$$T = \frac{\pi \times (D + h)}{Z} \times y \quad (58)$$

Пример.

Рассчитать длину витка секции статорной обмотки асинхронного двигателя с параметрами: внутренний диаметр сердечника статора D = 197 *мм*.; высота паза магнитопровода h = 19,1 *мм*.; число пазов Z.= 48; укороченный шаг секции обмотки y = 10; полная длина магнитопровода l = 200 *мм*.

Решение.

Длина активной части витка l = 0,2 *м*., так как магнитопровод статора не имеет поперечных каналов охлаждения (la = l).
Средняя ширина секции (58):

$$T = \frac{\pi \times (D + h)}{Z} \times y = \frac{3{,}14 \times (0{,}197 + 0{,}0191)}{48} \times 10 = 0{,}141 \text{ м}$$

Длина лобовой части витка (57):
$l_{Л} = k \times T + l' = 1{,}35 \times 0{,}141 + 0{,}03 = 0{,}22$ м

где: k – 1,35; l' – 0,03 *м*. (табл. 10. 5).
Длина витка секции (56):
$l_{В} = 2 \times (l\text{а} + l_{Л}) = 2 \times (0{,}2 + 0{,}22) = 0{,}84$ м

10. 9. Расчет массы обмотки.

Расчет массы обмотки, в частности, необходим для получения обмоточного провода со склада. Масса металла обмотки определяется путем умножения плотности материала жилы на объем провода, *кг*:
$G = m \times \gamma \times П_{ГОСТ} \times a \times a' \times l_{В} \times W_{Ф}$ (59)

где: γ – плотность проводникового материала, *кг/м*^{3} (для меди – 8900 *кг/м*^{3}, для алюминия – 2700 *кг/м*^{3}); $П_{ГОСТ}$ – сечение одной жилы обмоточного провода без изоляции, *м*^{2}; $П_{ГОСТ} \times a \times a'$ – полное сечение одного витка провода в секции, *м*^{2}; $l_{В} \times W_{Ф}$ – длина провода обмотки одной фазы, *м*; m – число фаз обмотки, *шт*.
Масса провода обмотки с изоляцией и учетом "срезок" (обрезки обмоточного провода, образующиеся при выполнении технологических процессов пайки и сварки), ориентировочно равна, *кг*:

$$G' = 1{,}05 \times G \quad (60)$$

Пример.

Рассчитать массу требуемого провода для обмотки трехфазного асинхронного двигателя с параметрами: марка провода – ПЭТ–155; активное сечение провода $П_{ГОСТ}$ = 3,14 *мм*^{2}; a = 1; a' = 1; $l_{В}$ = 0,73 *м*.; $W_{Ф}$ = 144.

Решение.

Находим массу провода обмотки трехфазного АД по выражению (59). Учитывая, что у марки ПЭТ–155 жила медная, γ = 8900 *кг/м*^{3}. Для получения объема провода в *м*^{3} сечение провода $П_{ГОСТ}$, данное в *мм*^{2}, приводим к *м*^{2} с помощью коэффициента 10^{-6}, отсюда:

$$G = m \times \gamma \times П_{ГОСТ} \times a \times a' \times l_{В} \times W_{Ф} = 3 \times 8900 \times 3{,}14 \times 10^{-6} \times 1 \times 1 \times 0{,}73 \times 144 = 8{,}8 \text{ кг}$$

Масса требуемого обмоточного провода с изоляцией и учетом "срезок" приблизительно равна (60):

$$G' = 1{,}05 \times G = 1{,}05 \times 8{,}8 = 9{,}24 \text{ кг}$$

10. 10. Электрическое сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии.

Определяется для сравнения его с результатами измерений сопротивлений фазных обмоток отремонтированной машины при приемосдаточных и типовых испытаниях. Сопоставление величин расчета и испытания дает возможность выявить дефекты, допущенные при ремонте обмоток. Электрическое сопротивление одной фазы обмотки постоянному току в холодном состоянии (R) определяется из выражения, *Ом*:

$$R = \rho \times \frac{l_{\text{В}} \times W_{\Phi}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \times a \times a'} \quad (61)$$

где: ρ – удельное сопротивление проводника, *Ом×мм*^{2}*/м* (в СИ *мкОм×м*) для меди (Cu) ρ = 0,0172 *Ом×мм*^{2}*/м*, для алюминия (Al) ρ = 0,028 *Ом×мм*^{2}*/м*, при 20°С.

Пример.

Определить сопротивление обмотки одной фазы, отремонтированного трехфазного асинхронного двигателя в холодном состоянии. Параметры обмотки: марка провода ПЭВ–2; длина витка секции $l_{\text{В}}$ = 0,4 *м*.; число витков в обмотке одной фазы W_{Φ} = 130; сечение обмоточного провода $\Pi_{\text{ГОСТ}}$ = 0,190 *мм*^{2}; число параллельных ветвей a = 1; число параллельных сечений a' = 1.

Решение.

Находим сопротивление обмотки по формуле (61):

$$R = \rho \times \frac{l_{\text{В}} \times W_{\Phi}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \times a \times a'} = 0{,}0172 \times \frac{0{,}4 \times 130}{0{,}19 \times 1 \times 1} = 4{,}71 \text{ Ом}$$

10. 11. Расчет номинальных данных.

Номинальными данными называют оптимальные величины параметров, на которые рассчитана нормальная работа электрооборудования. Основные из них приводятся в паспорте (металлической пластине, прикрепленной к корпусу машины). У асинхронного двигателя к таким расчетным номинальным данным относятся величины:

$U_{\text{Н}}$ – напряжение, *в*;
$I_{\text{Н}}$ – ток, *А*;
$P_{\text{Н}}$ – мощность, *кВт*;
$f_{\text{Н}}$ – частота тока, *гц*;
$n_{\text{Н}}$ – частота вращения ротора, *мин*$^{-1}$;
$cos\varphi_{\text{Н}}$– коэффициент мощности;
$\eta_{\text{Н}}$ – коэффициент полезного действия (КПД);
Y/△ – схема соединения обмотки.

Оптимальность этих показателей связана с конструкцией электромашины, материалами, из которых она изготовлена, условиями ее работы и прочим.
Например, номинальная частота тока $f_{\text{Н}}$ в первую очередь связана с ЭДС одного витка (30), чем больше f, тем выше $E_{1\text{В}}$, следовательно, меньше W_{Φ} (31), т. е. больше мощность электромашины при тех же размерах. Но вместе с увеличением f возрастают потери в листах электротехнической стали, а значит, нагрев машины. Вот почему номинальная частота f зависит от марки и толщины листа стали сердечника.

Номинальная частота вращения $n_{Н}$ предопределена частотой вращения подвижных частей машины, которую двигатель вращает. Номинальная схема соединения обмоток Y/△ вытекает из требуемой величины напряжения, прилагаемой к фазной обмотке, а также условий пуска машины. Номинальный коэффициент мощности $cos\varphi_{Н}$ определяется рациональным соотношением между составляющими (активной P и реактивной Q полной мощности асинхронного двигателя S. Чем больше активная составляющая P, тем лучше, так как будут меньше потери в сети. Номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{Н}$ зависит от потерь в электрической машине (в основном в меди обмоток – $P_{КЗ}$ и стали магнитопровода $P_{ХХ}$). Номинальное напряжение $U_{Н}$ связано с электрической прочностью изоляции ($E_{ПР}$) машины. Причем чем выше напряжение, тем больше должна быть прочность, а это связано с родом и толщиной используемых в изоляции составных диэлектриков, их $E_{ПР}$. Номинальный ток $I_{Н}$ устанавливается температурой нагрева изоляции, в первую очередь, за счет потерь в меди обмотки. Чем выше нагревостойкость изоляции и меньше потери, тем больше номинальный ток. Номинальная мощность $P_{Н}$ – производная номинальных: тока, напряжения, коэффициентов мощности и полезного действия, а значит зависит от тех же показателей. Из приведенных величины $U_{Н}$, $f_{Н}$, $n_{Н}$ схемы соединения обмотки машины заданы заказчиком (начало расчета).

Номинальный ток. Номинальный фазный ток двигателя равен произведению плотности тока на активную площадь обмоточного провода с учетом параллельных ветвей и сечений, A:

$$I_{НФ} = j \times П_{ГОСТ} \times a \times a' \quad (62)$$

где: j – плотность тока, $A/мм^2$; $П_{ГОСТ}$ – фактическое сечение провода без изоляции, $мм^2$.

Плотность тока, как, и ток, в первую очередь, определяется допустимой температурой нагрева изоляции. Однако на скорость ее старения влияют также и многие другие факторы: способ пропитки обмоток, опыт работы обмотчика, охлаждение АД и др. Поэтому, при выборе j в таблицах справочников (табл. 10. 1), где она приводится в зависимости от типа обмоток и мощности двигателей в довольно широких пределах, следует учитывать все параметры. Чтобы не допустить существенной ошибки в выборе плотности тока, найденная по формуле (62) величина фазного тока дополнительно проверяется по величине линейной нагрузки.

Линейная нагрузка двигателя представляет собой произведение тока на число активных проводников во всех пазах электромашины, приходящихся на 1 *м*. длины окружности внутренней расточки статора машины, $A/м$:

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a} \quad (63)$$

Результат вычисления линейной нагрузки сравнивается с допустимыми значениями, приведенными в таблицах. Если есть расхождение, то необходимо соответствующим образом изменить плотность тока в обмотке. В идеале оптимальной будет наибольшая возможная плотность тока, даже если она будет больше рекомендованной в таблице (при допустимой A), но вместе с тем следует учитывать сопутствующие факторы, состояние магнитопровода, пропитку обмотки и пр.

Номинальная мощность. Для расчета номинальной мощности вначале определяется полная мощность трехфазного асинхронного двигателя, которую он забирает из сети, *кВа*:

$$S_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times 10^{-3} \quad (64)$$

где: $I_{НФ}$ – номинальный фазный ток, A; $U_{НФ}$ – номинальное фазное напряжение, *в*.

Полученная мощность в машине $S_{ДВ}$ идет на создание вращающегося магнитного поля, на потери и выполнение полезной работы. Однако реактивная составляющая этой мощности Q затрачиваемая на создание магнитного потока (величина практически постоянная для данного магнитопровода), как известно из курса электротехники, возвращается обратно в сеть. Это учитывается углом φ между полной мощностью и ее активной составляющей. Следовательно (рис. 50, треугольник мощностей), активная составляющая – P (ее называют еще присоединенной мощностью двигателя), затрачиваемая на все остальное, определяется из выражения, *кВт*:

$$P_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi_{Н} \times 10^{-3} \quad (65)$$

где: $cos\varphi_{Н}$ – номинальный коэффициент мощности.

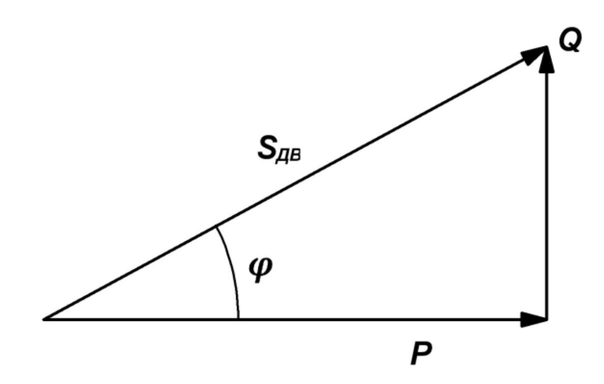


Рис. 50. Сумма мощностей трехфазного АД.

Расчетная номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя на валу (идущая на выполнение полезной работы) определяется по выражению, *кВт*:

$$P_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi_{Н} \times \eta_{Н} \times 10^{-3} \quad (66)$$

где: η –– номинальный коэффициент полезного действия, который учитывает все активные потери в электрической машине. Величины коэффициентов мощности $cos\varphi_{Н}$ и *кпд* $\eta_{Н}$ можно принять по каталожным данным двигателей, аналогичных рассчитываемому по типу, мощности и частоте вращения или по табл. 10. 6. Полученное значение мощности $P_{Н}$ округляется до ближайшего стандартного $P_{НГОСТ}$ и по известному выражению находится его номинальный ток $I_{НГОСТ}$. Последний еще раз проверяется по линейной нагрузке:

$$A = \frac{I_{НФгост} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a}$$

Таблица 10. 6. Средние значения коэффициентов мощности и кпд трехфазных асинхронных двигателей.

Частота вращения, *мин*$^{-1}$	кпд и *cos*φ при мощности, *кВт*		
	до 1	1–10	10–100
3000	$\frac{0{,}6-0{,}77}{0{,}7-0{,}87}$	$\frac{0{,}77-0{,}88}{0{,}87-0{,}90}$	$\frac{0{,}88-0{,}90}{0{,}90-0{,}92}$
1500	$\frac{0{,}57-0{,}72}{0{,}65-0{,}74}$	$\frac{0{,}75-0{,}86}{0{,}8-0{,}86}$	$\frac{0{,}87-0{,}92}{0{,}87-0{,}91}$
1000	$\frac{0{,}56-0{,}69}{0{,}62-0{,}72}$	$\frac{0{,}74-0{,}86}{0{,}74-0{,}82}$	$\frac{0{,}86-0{,}92}{0{,}86-0{,}89}$
750	$\frac{0{,}56-0{,}68}{0{,}60-0{,}62}$	$\frac{0{,}70-0{,}85}{0{,}68-0{,}75}$	$\frac{0{,}86-0{,}92}{0{,}80-0{,}85}$

Примечание. Большие значения *cos*φ и η берутся для больших мощностей АД: в числителе – η, в знаменателе – *cos*φ.

Если полученная линейная нагрузка удовлетворяет допустимой ($A_{ДОП}$), определяется фактическая плотность тока по формуле, *А/мм*^{2}:

$$j = \frac{I_{НФГОСТ}}{П_{ГОСТ} \times a \times a'} \quad (67)$$

В случае, когда магнитная система ремонтируемой машины не соответствует исходной номинальной частоте вращения ($n_Н$), на которую была рассчитана, а следовательно, нарушена согласованность площадей $Q\delta$, Q_Z, Q_C, проверку линейной нагрузки после определения j проводить нерационально, можно ограничиться пределами допустимых плотностей тока (табл. 10. 1).

Пример.
Определить номинальную мощность трехфазного асинхронного двигателя с двухслойной обмоткой и изоляцией класса F, работающего в условиях повышенной температуры котельной, с расчетными параметрами: номинальное напряжение – 380/220 *в*; частота тока 50 *гц*; частота вращения поля статора (соответствует расчетной) – 1500 *мин*$^{-1}$; обмоточный провод ––ПСД × 2,0 ×2 × 1,6/1,89; число проводников в пазу– 12 *шт*.; число пазов магнитопровода –48 *шт*.; внутренний диаметр расточки статора – 197 *мм*.; число параллельных ветвей – 1; число параллельных сечений – 2.

Решение.
Количество пар полюсов (4):

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$$

Приблизительная полная мощность асинхронного двигателя (при D = 197 *мм*. и числе пар полюсов p = 2 (см. рисунок на стр.) – $S_{ДВ} = f(D)$) $S_{ДВ} \approx$ 17–18 *кВа*. С учетом *cos*φ и *кпд* мощность $P_Н$ на валу будет в пределах 10–100 *кВт.*
Номинальный ток двигателя (62):

$$I_{НФ} = j \times П_{ГОСТ} \times a \times a' = 6 \times 2 \times 1 \times 2 = 24\ A$$

j по табл. 10.1 принята равной 6 *А/мм*^{2}, так как обмотка АД двухслойная, изоляция его и обмоточного провода относится к классу F.

Линейная нагрузка при $I_{НФ}$ – 24 А по формуле (63):

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a} = \frac{24 \times 12 \times 18}{3{,}14 \times 0{,}197 \times 1} = 22347\ A/\text{м}$$

Так как расчетная линейная нагрузка (A = 22,35×10^{-3} $A/м$) меньше, чем допустимая (табл. 10.1 – $А_{ДОП}$ = 25,0 – 30,0×10^{-3} $A/м$), принимаем плотность тока j = 7,5 $A/мм.$, тогда номинальный ток машины будет:

$$I_{НФ} = j \times П_{ГОСТ} \times a \times a' = 7{,}5 \times 2 \times 1 \times 2 = 30{,}0\ \text{А}.$$

При этом линейная нагрузка составит:

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a} = \frac{30 \times 12 \times 18}{3{,}14 \times 0{,}197 \times 1} = 27935\ A/\text{м}$$

Отсюда при номинальном токе $I_{НФ}$ = 30,0 А линейная нагрузка находится в пределах нормы $А_{ДОП}$. Полная мощность асинхронного двигателя (64):

$$S_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times 10^{-3} = 3 \times 30 \times 220 \times 10^{-3} = 19{,}8\ \text{кВа}$$

В табл. 10.6 для мощностей АД в пределах 10–100 *кВт* при числе оборотов поля в расточке статора 1500 *мин*$^{-1}$ коэффициент мощности (*cos*φ) можно принять равным 0,87, а *кпд* (η) = 0,87, тогда присоединенная мощность АД (65):

$$P_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi_{Н} \times 10^{-3} = 3 \times 30 \times 220 \times 0{,}87 \times 10^{-3} = 17{,}23\ \text{кВт}$$

Расчетная номинальная мощность асинхронного двигателя Рн (66):

$$P_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi_{Н} \times \eta_{Н} \times 10^{-3} = 3 \times 30 \times 220 \times 0{,}85 \times 0{,}85 \times 10^{-3} = 14{,}99\ \text{кВт}$$

Ближайшая стандартная номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с расчетными параметрами (по справочнику) будет:

$P_{Н}$ = 15 кВт; $U_{НФ}$ = 220 В; $n_{Н}$ = 1500 *мин*$^{-1}$; *cos*φ = 0,88; η = 0,885.

Номинальный ток:

$$I_{НГОСТ} = \frac{P_{Н} \times 10^3}{3 \times U_{НФ} \times cos\varphi \times n_{Н}} = \frac{15 \times 10^3}{3 \times 220 \times 0{,}88 \times 0{,}885} = 29{,}2\ A$$

Линейная нагрузка АД при $I_{Н}$ = 29,2 A:

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a} = \frac{29{,}2 \times 12 \times 48}{3{,}14 \times 0{,}197 \times 1} = 27 \times 10^3\ A/\text{м}$$

Так как расчетная линейная нагрузка (A = 27,19 $A/м$) отвечает допустимой (табл. 1 – $A_{ДОП}$ = 25,0 – 30,0×10^3 $A/м$), определяем фактическую плотность тока (67):

$$j = \frac{I_{НФГОСТ}}{П_{ГОСТ} \times a \times a'} = \frac{29{,}2}{2 \times 1 \times 1} = 7{,}3\ \ A/\text{мм}^2$$

Глава 11. Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных двигателей на другие параметры.

Каждый хороший специалист должен уметь максимально упрощать расчеты. Это не просто облегчает работу, но дает возможность экономить и время, и средства. Сказанное в полной мере относится к нашим расчетам. Например, при модернизации трехфазных асинхронных двигателей, когда их надо включить на другое напряжение или получить у электромашин другую частоту вращения ротора и при этом известны все данные старой обмотки, тогда нет необходимости проводить расчеты новых обмоток в полном объеме. В таких случаях делается упрощенный перерасчет.

11. 1. Перерасчет асинхронного двигателя на другое напряжение.

Для определения параметров новой обмотки пользуются формулами ранее проведенного расчета. Число витков в обмотке одной фазы машины (31):

$$W_{Ф} = \frac{0{,}97 \times U_{Ф}}{4{,}44 \times f \times Ф \times K_{ОБ}}, \quad \text{отсюда} \quad W_{Ф} = \frac{0{,}97 \times U_{Ф}}{E_{1В}} \quad (68)$$

так как при изменении напряжения старого $U_{ФС}$ на новое $U_{ФН}$ (индексы указывают старые и новые величины) магнитная система двигателя и частота тока для рассматриваемых обмоток не изменяются, то *эдс* одного витка – также величина постоянная ($E_{1В} = 4{,}44 \times Ф \times К_{ОБ}$). Из формул (68) для статорной обмотки, если:

$$W_{ФС} = \frac{0{,}97 \times U_{ФС}}{E_{1В}}, \quad \text{отсюда} \quad E_{1В} = \frac{0{,}97 \times U_{ФС}}{W_{ФС}} \quad (69)$$

Для новой обмотки, если:

$$W_{ФН} = \frac{0{,}97 \times U_{ФН}}{E_{1В}}, \quad \text{то} \quad E_{1В} = \frac{0{,}97 \times U_{ФН}}{W_{ФН}} \quad (70)$$

При равенстве в выражениях (69) и (70) $E_{1В}$ получается, что:

$$W_{ФН} = W_{ФС} \times \frac{U_{Н}}{U_{С}} \quad (71)$$

Изменение числа витков в фазе пропорционально меняет число активных проводников в пазу $N_{П}$ (34), тогда:

$$N_{ПН} = N_{ПС} \times \frac{U_{Н}}{U_{С}} \quad (72)$$

Сделанные преобразования позволяют получить новые сечения $П_{РН}$ и диаметр $d'_{Н}$ обмоточного провода новой обмотки из выражений:

$$П_{РН} = П_{РС} \times \frac{U_{С}}{U_{С}} \quad (73) \qquad d'_{Н} = d'_{С} \times \sqrt{\frac{U_{С}}{U_{Н}}} \quad (74)$$

По значениям $П_{РН}$ и $d'_{Н}$ в таблицах справочников, находится стандартный провод. Проверка его по размеру шлица паза выполняется так же, как было рассмотрено ранее.

Учитывая, что изменений в количестве полюсов при новой обмотке нет, все обмоточные данные (a, y, q, N) берутся по показателям старой обмотки, следовательно, схема обмотки в электродвигателе остается неизменной. Остаются прежними: размер витка $l_В$, масса обмоточного провода G' (потому что изменение $W_Ф$ пропорционально изменению сечения провода $П_Р$), без изменения остается и номинальная мощность машины $P_Н$ (так как изменение номинального тока $I_Н$ пропорционально номинальному напряжению $U_Н$). Целесообразно проверить только сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии – R.

Пример.
Пересчитать двухслойную обмотку трехфазного асинхронного двигателя с напряжения 380/220 *в* на напряжение 220/127 *в*. Условия работы двигателя оставить без изменения. Параметры старой обмотки: число витков в обмотке одной фазы $W_{ФС}$ = 144 *шт.*; число параллельных ветвей $a_С$ = 1; длина витка секции обмотки $l_В$ = 0,73 *м.*; число проводников в одном пазу $N_{ПС}$ = 18 *шт.*; обмоточный провод ПЭТ–155×3,14×1×2,0/2,1; сопротивление обмотки фазы постоянному току R = 0,587 *Ом.*; ширина шлица паза bш = 3,7 *мм*.

Решение.
Определим новые параметры обмотки:
1. Число витков в обмотке одной фазы (71):

$$W_{ФН} = W_{ФС} \times \frac{U_Н}{U_С} = 144 \times \frac{127}{220} = 83{,}12 \text{ шт.}$$

Округляем до ближайшего целого и четного значения $W_{ФН}$ = 84 *шт*.
2. Число витков в одной секции $W_{СН}$ равно половине числа проводников в одном пазу $N_{ПН}$ (72):

$$N_{ПН} = N_{ПС} \times \frac{U_Н}{U_С} = 18 \times \frac{127}{220} = 10{,}39 \text{ шт.}$$

Для двухслойной обмотки округляем $N_{ПН}$ до 10.
3. Число витков в одной секции (51):

$$W_С^{(2)} = \frac{N_П}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ шт.}$$

4. Выбираем обмоточный провод для новой обмотки:
Условия работы электрической машины не изменились, следовательно, изоляцию ее можно оставить прежней, принимаем марку провода ПЭТ–155.
Новое сечение обмоточного провода $П_{РН}$ (73):

$$П_{РН} = П_{РС} \times \frac{U_С}{U_Н} = 3{,}14 \times \frac{220}{127} = 5{,}44 \text{ мм}^2$$

Диаметр провода с изоляцией новой обмотки $d'_Н$ (74):

$$d'_Н = d'_С \times \sqrt{\frac{U_С}{U_Н}} = 2{,}12 \times \sqrt{\frac{220}{127}} = 3{,}67 \text{ мм}$$

В таблице стандартных проводов (приложение 10) обмоточный провод ПЭТ–155 требуемого диаметра отсутствует.

Принимаем два параллельных сечения (a' = 2); тогда $П_{РН}$ = 5,44/2 = 2,72 *мм*^{2}, по формуле диаметр провода без изоляции:

$$d'_{Н} = \sqrt{\frac{4 \times П_{РН}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2,72}{3,14}} = 1,86\ мм$$

По стандарту $d_{ГОСТ}$ =1,9 *мм*., $П_{РНГОСТ}$ = 2,83 *мм*^{2}; диаметр провода ПЭТ–155 с изоляцией $d'_{ГОСТ}$ = 2,02 *мм*. Проверка возможности прохода провода через шлиц паза:

$$d'_{ГОСТ} < bш - (1,5 - 2);\ 2,02 < 3,7 - 1,5\ мм.$$

Условие укладки активных проводников в паз выполнено, следовательно, принимаем для изготовления новой обмотки провод:

$$ПЭТ - 155 \quad 2,83 \times 2 \times \frac{1,90}{2,02}$$

Сопротивление обмотки одной фазы в холодном состоянии (61):

$$R = \rho \times \frac{l_{В} \times W_{Ф}}{П_{ГОСТ} \times a \times a'} = 0,0172 \times \frac{0,73 \times 84}{2,83 \times 1 \times 2} = 0,71\ Ом$$

Все остальные параметры новой обмотки асинхронного двигателя практически должны соответствовать старой.

11. 2. Перерасчет асинхронного двигателя на другую частоту вращения.

Перерасчет начинают с того, что проверяют возможность использования магнитопровода данной машины техническому заданию на новую частоту вращения поля в расточке статора. При изменении частоты ($n_{Н}$) после ремонта может иметь место: "залипание" или "застревание" ротора машины на пониженных оборотах, а также может появиться "повышенный шум". В том случае, если расчеты по формулам (40 – 44) дали положительный результат, можно приступить к пересчету обмотки. Причем расчетные формулы определения новых параметров обмотки получаются путем преобразования уже известных выражений. Число витков в обмотке одной фазы (31):

$$W_{Ф} = \frac{0,97 \times U_{Ф}}{4,44 \times f \times Ф \times K_{ОБ}} \quad или \quad 0,97 \times U_{Ф} = 4,44 \times f \times Ф \times K_{ОБ} \times W_{Ф}$$

но, так как:

$$Ф = \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta, \quad а\ частота\ тока\ f = \frac{p \times n}{60}, то\ тогда:$$

$$0,97 \times U_{ФС} = 4,44 \times \frac{p_{С} \times n_{С}}{60} \times \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta_{С} \times K_{ОБ} \times W_{ФС}$$

$$0,97 \times U_{ФН} = 4,44 \times \frac{p_{Н} \times n_{Н}}{60} \times \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta_{Н} \times K_{ОБ} \times W_{ФН}$$

Если величины фазных напряжений равны ($U_{ФС} = U_{ФН}$), то:

$$4,44 \times \frac{p_{С} \times n_{С}}{60} \times \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta_{С} \times K_{ОБ} \times W_{ФС} = 4,44 \times \frac{p_{Н} \times n_{Н}}{60} \times \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta_{Н} \times K_{ОБ} \times W_{ФН}$$

Сократив в правой и левой части равенства одинаковые величины и учитывая, что произведения $p_С \times Q\delta_С$ и $p_Н \times Q\delta_Н$ равны (это площадь одной и той же расточки статора), получим при переводе электродвигателя на большую частоту вращения ($n_Н > n_С$):

$$W_{ФН} = W_{ФС} \times \frac{n_С}{n_Н \times k_П}, \text{ тогда и } \quad W_{секН} = W_{секС} \times \frac{n_С}{n_Н \times k_П}$$

где: $W_{СЕК}$ – число витков в одной секции обмотки, *шт*. Изменение $W_{ФН}$ а значит и $W_{СЕКН}$, а также числа активных проводников в одном пазу изменит сечение провода обмотки $П_Р$ и мощность $P_Н$ машины. Проведенные преобразования дают следующие выражения:

$$П_{РН} = П_{РС} \times \frac{n_Н \times k_П}{n_С} \qquad P_{НН} = P_{НС} \times \frac{n_Н \times k_П}{n_С}$$

При уменьшении частоты вращения электродвигателя ($n_Н < n_С$) число витков в одной секции будет равно:

$$W_{СЕКН} = W_{СЕКС} \times \frac{n_С \times k_П}{n_Н} \quad (75)$$

где: $k_П$ – поправочный коэффициент перерасчета, равный 0,65–0,85. Сечение провода в обмотке $П_Р$ и мощности электромашины $P_Н$:

$$П_{РН} = П_{РС} \times \frac{n_Н}{n_С \times k_П} \quad (76) \qquad P_{НН} = P_{НС} \times \frac{n_Н}{n_С \times k_П} \quad (77)$$

Главное условие при перерасчете – *сохранение допустимых величин магнитных нагрузок в магнитопроводе статора* ($B\delta$, B_Z, B_C) неизменными (табл. 10. 2). Не должно меняться также и напряжение, приложенное к обмотке.

Чем больше разница между старой и новой частотами вращения, тем меньшим принимают значение поправочного коэффициента. Введение поправочного коэффициента $k_П$ обусловлено тем, что при уменьшении числа полюсов (увеличении частоты вращения) и при сохранении индукции в воздушном зазоре возрастает индукция в спинке статора, в зубцах статора она остается неизменной. При увеличении числа полюсов (уменьшении частоты вращения) имеет место обратная зависимость. Пересчитываются и обмоточные данные, при этом шаг и число пазов на полюс и фазу можно находить по выражениям:

$$y_Н = y_С \times \frac{n_Н}{n_С} \quad (78) \qquad q_Н = q_С \times \frac{n_Н}{n_С} \quad (79)$$

Схема обмотки при переходе на другую частоту вращения изменяется, значит необходимо рассчитать все недостающие обмоточные данные.

Пример.

Пересчитать двухслойную обмотку трехфазного асинхронного двигателя $P_Н$ = 22 *кВт*; ($U_Н$ = 380/220 *в*; f = 50 Гц; $I_Н$ = 42,9 *А*; Y/△; $cos\varphi$ = 0,87; $\eta_Н$ = 0,905 с частоты вращения n = 1500 *мин*$^{-1}$ на частоты: n = 750 *мин*$^{-1}$; n = 1000 *мин*$^{-1}$. Условия работы двигателя оставить без изменения. Параметры старой обмотки: петлевая, двухслойная; число витков в одной секции $W^{(2)}_{СЕК}$ – 6; марка и размеры обмоточного провода ПСД×2,0×2×1,6/1,89; число параллельных сечений a' = 2; число параллельных ветвей a = 1; длина витка $l_В$ = 0,812 *м*.; количество фазных катушек $N^{(2)}_{3Ф}$ = 12; полный шаг обмотки y' = 12; число секций в катушечной группе q = 4. Число зубцов статора Z_1 = 48; число зубцов ротора Z_2 = 36. Диаметр внутренней расточки статора D = 197 *мм*.; длина магнитопровода l = 200 *мм*.; высота паза h = 0,0191 *мм*.; ширина шлица паза bш = 3,7 *мм*.

Проверка.

1. Проверяем допустимость проведения пересчета старой обмотки на новое число оборотов n = 750 $мин^{-1}$, в этом случае количество пар полюсов:

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{750} = 4 \text{ шт.}$$

Проверка на "прилипание" по выражению (40):

$$Z_2 \neq Z_1 - 36 \neq 48;\; Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 - 36 \neq 0{,}5 \times 48;\; Z_2 \neq 2 \times Z_1 - 36 \neq 2 \times 48$$

требованиям по этим позициям удовлетворяются, но по формуле (41):

$$Z_2 = (2p \times 3) \times i, \text{однако } 36 \neq (2 \times 4 \times 3) \times i, 36 \neq (2 \times 4 \times 3) \times 2$$

т. е. ни при i = 1, ни при i = 2 равенство не выдерживается. Следовательно, на данном магнитопроводе новая обмотка для $n_{\text{Н}}$ = 750 $мин^{-1}$ выполнена быть не может.

2. Проверяем допустимость проведения пересчета старой обмотки на новое число оборотов n = 1000 $мин^{-1}$, в этом случае количество пар полюсов:

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3 \text{ шт.}$$

Проверка на "прилипание" по формулам (40) и (41):

$$Z_2 \neq Z_1 - 36 \neq 48;\; Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 - 36 \neq 0{,}5 \times 48;\; Z_2 \neq 2 \times Z_1 - 36 \neq 2 \times 48$$

принимаем i = 2, тогда:

$$Z_2 = (2p \times 3) \times i - 36 = (2 \times 3 \times 3) \times 2$$

по всем уравнениям требования удовлетворяются.
Проверка на "застревание" ротора на пониженной частоте вращения. Принимаем: i = 1 и i = 2, тогда по формулам (42), (43):

$$Z_2 \neq 2p \times (3 \times i + 1) - 36 \neq 2 \times 3 \times (3 \times 1 + 1) \text{ и } 36 \neq 2 \times 3 \times (3 \times 2 + 1)$$

$$Z_2 \neq Z_1 \pm p - 36 \neq 48 + 3, \text{ и } 36 \neq 48 - 3$$

$$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p - 36 \neq 48 + 2 \times 3, \text{ и } 36 \neq 48 - 2 \times 3$$

$$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p - 36 \neq 0{,}5 \times 48 + 3, \text{ и } 36 \neq 0{,}5 \times 48 - 3$$

$$Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p - 36 \neq 2 \times 48 + (2 \times 3), \text{ и } 36 \neq 2 \times 48 - (2 \times 3)$$

по всем уравнениям требования удовлетворяются.
Проверка на "повышенный шум". Принимаем i = 2, по выражению (44):

$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i \pm 1 - 36 \neq 2 \times 3 \times 3 \times 2 + 1 \text{ и } 36 \neq 2 \times 3 \times 3 \times 2 - 1$$

$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i \pm (2p \pm 1) - 36 \neq 2 \times 3 \times 3 \times 2 + (2 \times 3 + 1) \text{ и}$$

$$36 \neq 2 \times 3 \times 3 \times 2 + (2 \times 3 - 1)$$

$$36 \neq 2 \times 3 \times 3 \times 2 - (2 \times 3 + 1) \quad \text{и} \quad 36 \neq 2 \times 3 \times 3 \times 2 - (2 \times 3 - 1)$$

по всем уравнениям требования удовлетворяются. Исходя из проведенной проверки пересчет старой обмотки при частоте вращения поля в расточке статора АД n = 1500 $мин^{-1}$, на новую обмотку, с частотой вращения n = 1000 $мин^{-1}$, допустим.

Решение.

Проведем расчет параметров новой обмотки. Так как 1000 < 1500, т. е. $n_Н < n_С$, для перерасчета воспользуемся выражениями:
1. Число витков в одной секции (75):

$$W_{СЕКН}^{(2)} = W_{СЕКС}^{(2)} \times \frac{n_С \times k_П}{n_Н} = 6 \times \frac{1500 \times 0{,}8}{1000} = 7{,}2 \text{ шт}$$

Округляем до 7 витков, тогда у двухслойной обмотки в пазу будет 14 активных проводников ($N_{ПН}$ = 14), следовательно, число витков в обмотке одной фазы будет равно:

$$W_{ФН} = \frac{N_{ПН} \times Z}{2 \times m \times a} = \frac{14 \times 48}{2 \times 3 \times 1} = 112 \text{ шт}$$

2. Рассчитаем данные нового обмоточного провода и выберем его. Находим сечение провода (76):

$$П_{ПР} = П_{РС} \times \frac{n_Н}{n_С \times k_П} = 2{,}0 \times \frac{1000}{1500 \times 0{,}8} = 1{,}66 \text{ мм}^2$$

По заданию условия работы двигателя остаются неизменными, поэтому марку провода оставляем прежней – ПСД. По полученному сечению $П_{РН}$ находим диаметр нового провода:

$$d'_Н = \sqrt{\frac{4 \times П_{РН}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1{,}66}{3{,}14}} = 1{,}45 \text{ мм}$$

В ГОСТ диаметра такого провода для марки ПСД нет. Принимаем $d'_{НГОСТ}$ = 1,47 *мм*. Отсюда новый обмоточный провод в соответствии с ГОСТ будет:

$$\text{ПСД } 1{,}09 \times \frac{1{,}18}{1{,}47}$$

Проверка возможности прохода провода через шлиц паза:

$$d'_{ГОСТ} < b\text{ш} - (1{,}5 - 2) - 1{,}47 < 3{,}7 - 1{,}5 \text{ мм}$$

Условия укладки активных проводников в паз выполнено.

3. Определим новые обмоточные данные по формулам: шаг обмотки (78):

$$\text{полный:} \quad y_Н = y_С \times \frac{n_Н}{n_С} = 12 \times \frac{1000}{1500} = 8$$

$$\text{укороченный:} \quad y_Н = 0{,}8 \times y_Н = 0{,}8 \times 8 = 6{,}4$$

Принимаем укороченный шаг равным 6.
Число пазов на полюс и фазу (число секций в фазной катушке) (79):

$$q_{\text{Н}} = q_{\text{С}} \times \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{С}}} = 4 \times \frac{1000}{1500} \approx 2{,}66 = 2\frac{2}{3}$$

обмотка выполнима только при разном числе секций в катушечных группах и неполном заполнении пазов в расточке статора.
Число катушечных групп (фазных катушек) (17):

$$N_{\text{НЗФ}}^{(2)} = 2p \times m = 2 \times 3 \times 3 = 18$$

4. Рассчитаем длину витка секции новой обмотки.
Длина активной части витка l = 0,2 *м.*, так как магнитопровод статора не имеет поперечных каналов охлаждения ($la = l$). Средняя ширина секции (58):

$$T = \frac{\pi \times (D + h)}{Z} \times y = \frac{3{,}14 \times (0{,}197 + 0{,}0191)}{48} \times 6 = 0{,}085 \text{ м}$$

Длина лобовой части витка по выражению (57):

$$l_{\text{Л}} = k \times T + l' = 1{,}55 \times 0{,}085 + 0{,}03 = 0{,}162 \text{ м}$$

где поправочный коэффициент k равен 1,55 (табл. 10. 5); коэффициент запаса l' – 0,03 *м.* (табл. 10. 5). Длина витка секции (56):

$$l_{BH} = 2 \times (l\text{а} + l_{\text{Л}}) = 2 \times (0{,}2 + 0{,}162) = 0{,}724 \text{ м}$$

5. Найдем массу провода новой обмотки по формуле (59):

$$G = m \times \gamma \times \Pi_{\text{РГОСТ}} \times a \times a' \times l_{\text{В}} \times W_{\text{Ф}} = 3 \times 8900 \times 1{,}09 \times 10^{-6} \times 1 \times 1 \times 0{,}724 \times 112 = 2{,}16 \text{ кг}$$

С учетом изоляции и "срезок" – по уравнению (60):

$$G' = 1{,}05 \times G = 1{,}05 \times 2{,}16 = 2{,}27 \text{ кг}$$

6. Определим сопротивление новой обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии по формуле (61):

$$R = \rho \times \frac{l_{\text{ВН}} \times W_{\text{ФН}}}{\Pi_{\text{РНГОСТ}} \times a \times a'} = 0{,}0172 \times \frac{0{,}724 \times 112}{1{,}09 \times 1 \times 1} = 1{,}28 \text{ Ом}$$

7. Новая мощность АД после пересчета обмотки на новую частоту вращения поля в расточке статора, равную 1000 *мин*$^{-1}$ (77):

$$P_{\text{НН}} = P_{\text{НС}} \times \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{С}} \times k_{\text{П}}} = 22{,}0 \times \frac{1000}{1500 \times 0{,}8} = 18{,}3 \text{ кВт}$$

Синхронные скорости (*об. мин.*) при различных числах полюсов и различных частотах

Число полюсов	Частота, *гц*,	
	50	60
	Синхронные скорости (*об. мин.*)	
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600
14	423	514
16	375	450
18	333	400
20	300	360
22	273	327
24	250	300
26	231	277
28	214	257
30	200	240
32	187	225